



Manuel Vacas de Carvalho Ponce Dentinho

**Licenciado em Engenharia Mecânica na Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa**

Melhoramento de um Processo de Cromagem de Segmentos de Pistão

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Engenheira Elsa Carvalho, Engenheira de Produção da
Empresa MAHLE Componentes de Motores S.A.

Presidente: Prof. Doutor António José Freire Mourão.

Vogais: Prof. Doutor José Manuel Vicente Fradinho.

Prof. Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho.



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Copyright © Manuel Vacas de Carvalho Ponce Dentinho, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“Bela é a paisagem que está certa”

[Álvaro Dentinho]

Agradecimentos

Ao professor Alberto Martinho, na qualidade de orientador e professor da disciplina de Órgãos de Máquinas no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, por ter aceitado ser meu orientador desde Outubro de 2014 e por toda a disponibilidade concedida, orientação e sugestões que foram imprescindíveis ao longo da realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da MAHLE Componentes de Motores S.A., por me ter recebido e aceite na empresa, bem como por todo o interesse demonstrado no acompanhamento dos trabalhos que realizei desde Outubro de 2014 até Junho de 2015.

À Engenheira Elsa Carvalho, minha orientadora na empresa MAHLE, por todo o conhecimento que me transmitiu.

Um grande obrigado ao Mário Silva, operador da linha de cromagem, bem como a todo o Departamento Metalúrgico por toda a ajuda, conhecimento e sugestões que me transmitiram ao longo destes meses.

Aos meus colegas e grandes amigos que me acompanharam ao longo dos anos de curso.

Por fim, um agradecimento especial à minha família, em especial aos meus pais e irmãos.

RESUMO

Neste trabalho estudam-se os parâmetros que influenciam o processo de cromagem de segmentos de pistão utilizado na MAHLE Componentes de Motores S.A., situada em Portugal na zona industrial de Murte de perto de Coimbra.

Pretende-se identificar a influência dos vários parâmetros do processo de cromagem na dureza, com o intuito de otimizá-la. Estabelece-se como objetivo principal a identificação de fatores que permitam diminuir o aparecimento de lascas (objeto de estudo) no revestimento dos segmentos. Para além disso, pretende-se quantificar a dureza extremamente fragil do revestimento para futuramente melhorar o controlo de qualidade efetuado na fábrica e deste modo, reduzir a ocorrência de peças com defeito.

Neste trabalho recorre-se à metodologia Seis Sigma, muito utilizada em engenharia no melhoramento contínuo de processos.

Após a realização de ensaios e correspondente análise de resultados, obtêm-se os valores dos parâmetros do processo que permitem a redução dos defeitos na cromagem dos segmentos. Com os resultados deste estudo espera-se melhorar a qualidade dos produtos (segmentos de pistão), aumentar a produtividade e simultaneamente diminuir o refugo, com as vantagens económicas daí decorrentes.

Palavras-chave: Seis Sigma, Cromagem, Segmentos de pistão

ABSTRACT

In this research project were studied the parameters that influence the chromium plating process of piston rings used in the company MAHLE Componentes de Motores S.A., located in Portugal, near Coimbra.

The aim was to identify the influence of the various parameters of the chromium plating process on the fragility, with the goal of improving it. The main goal was to identify the factors that allow the reduction of the number of chips (the object of this study) in the coating of the rings. In addition, it was intended to quantify the fragility of the coating in order to improve future the quality control done in this company's factory and, thereby, reduce the occurrence of damaged rings.

In this research it was used the Six Sigma methodology.

After the tests and analysis of the results, parameter values were obtained, allowing for a reduction of defects on the ring's coating.

With this research it is expected to improve product quality, increase productivity and simultaneously reduce waste, with all the economic advantages that result from this.

Keywords: Chromium Plating, Six Sigma, Piston Ring.

ÍNDICE

Resumo	v
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xii
1. INTRODUÇÃO	13
2. Propriedades Mecânicas dos Materiais	15
3. MAHLE Componentes de Motores S.A.	17
3.1. Produto	19
3.1.1. Definição do Segmento de Pistão	19
3.1.2. Tipos de Segmentos de Pistão e Respetivas Funções	19
3.1.3. Nomenclatura dos Segmentos de Pistão	20
3.1.4. Processo de Fabrico	22
3.2. Cromagem	24
3.2.1. Tipos de Cromagem: Decorativa e Funcional	24
3.2.2. Revestimento por Eletrodeposição	25
3.2.3. Linhas de Cromagem- Monocamada e Multicamadas	26
3.2.4. Equipamento da Linha de Cromagem	28
3.2.5. Fluxo da Linha de Cromagem	32
3.2.6. Controlo das Variáveis de Cromagem	34
4. Melhoria continua- Metodologia Seis Sigma	37
4.1. Melhoria Contínua na MAHLE	37
4.2. Seis Sigma	37
4.2.1. Passos Seis Sigma	38
4.2.2. Análise DOE	39
4.2.3. Análise do Processo- <i>Ishikawa</i>	40
5. Procedimento experimental	41
5.1. Tipos de Ensaaios Mecânicos dos Materiais	41
5.2. Aplicação do Diagrama Causa/Efeito	43
5.2.1. Planeamento de Experiências	46
5.3. Ensaio Experimental	47
5.3.1. 1ª Parte- Ensaaios Destrutivos efetuados no IPN	47
5.3.2. 2º Parte: Cromagem de Segmentos em Produção Normal para Ensaio	49
6. Resultados	51
6.1. Resultados Fornecidos pelo Instituto Pedro Nunes (IPN)	51
6.1.1. <i>Ensaio de Scratch</i>	51
6.1.2. Quantificação da dureza da Camada de Crómio	56
6.1.3. <i>Ball cratering</i>	58
6.1.4. Ensaio de Nano Indentação – IPN	59
6.2. Resultado da Cromagem de Segmentos para Ensaio na Linha de Produção	60
6.2.1. Análise de Refugo	60

6.2.2. Análise de resultados- Minitab.....	62
6.3. Confirmação dos Resultados	66
6.3.1. Ensaios	66
6.3.2. Resultados Metalográficos	67
6.3.3. Resultados dos Ensaios de Confirmação.....	68
7. Conclusões.....	70
8. REFERÊNCIAS bibliográficas	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Clientes MAHLE Componentes de Motores S.A.	18
Figura 3-2. Certificação do sistema de gestão da qualidade.....	18
Figura 3-3. Tipos de segmentos.....	19
Figura 3-4. Nomenclatura de um segmento de pistão	21
Figura 3-5. Processo de manufatura: a) Segmento no início do processo de produção; b) Segmento no final de processo de produção	22
Figura 3-6. Diagrama de operações do processo de manufatura de segmentos de pistão ...	23
Figura 3-7. Crómio funcional (à esquerda); Crómio decorativo (à direita).....	24
Figura 3-8. a) Cromagem decorativa com espessura entre 0,005-0,015mm [15] b) Cromagem funcional com espessura entre 0.013-0,038mm	25
Figura 3-9. Tanque de cromagem.....	26
Figura 3-10. Camada de Crómio: a) Monocamada ; b) Multicamada.....	27
Figura 3-11. Sequência de deposição a) Deposição de Crómio; b) Reversão; c) Deposição da camada seguinte.....	27
Figura 3-12. Tanque de cromagem.....	29
Figura 3-13. Ânodos	29
Figura 3-14. Posicionamentos dos ânodos relativamente aos cátodos. Planta do tanque de cromagem	30
Figura 3-15. Densidade de corrente para a linha de monocamada e multicamadas. (Diagrama exemplificativo)	32
Figura 3-16. Diagrama de fluxo de cromagem da linha de multicamadas	34
Figura 3-17. Gráfico de eficiência de densidade de corrente	35
Figura 4-1. Ciclo Seis Sigma.....	38
Figura 4-2. Diagrama Ishikawa ou de Causa/Efeito.....	40
Figura 5-1. Scratch test. Figura adaptada [13].....	42
Figura 5-2. Nano Indentação	42
Figura 5-3. Ball cratering.....	43
Figura 5-4. Parâmetros associados com fragilidade da camada de Crómio	44
Figura 5-5. Provete para ensaio a) No início b) Antes de cromar	48
Figura 5-6. Montagem da árvore- Face plana do provete de ensaio.....	49
Figura 6-1. <i>Scratch test</i> - a) Planta da indentação; b) Corte da camada indentada- IPN	52

Figura 6-2. Tipos de falhas [13]	52
Figura 6-3. Ensaio de <i>Scratch</i> - a)Fissuras grossas; b)Fissuras finas- IPN	53
Figura 6-4. Delaminações-IPN	53
Figura 6-5. Imagens MEV- a) Antes da Indentação; b) Depois de Indentação- IPN	54
Figura 6-6. Zonas de análise- IPN	54
Figura 6-7. Zona 1- IPN	55
Figura 6-8. Zona 2- IPN	55
Figura 6-9. Zona 3- Falha de aderência- IPN	56
Figura 6-10. Zona 4-IPN	56
Figura 6-11. Gráfico do resultado da avaliação das características da camada.	58
Figura 6-12. <i>Ball cratering</i> - IPN a) e b) Imagem captada de duas indentações.....	59
Figura 6-13. Gráfico relativo ao refugo final de segmentos com lascas	61
Figura 6-14. Gráfico de sobreposição do número de lascas com a avaliação da dureza.....	62
Figura 6-15. Influência dos diferentes parâmetros no aparecimento de lascas- Minitab	63
Figura 6-16. Interação entre parâmetros- <i>Minitab</i>	64
Figura 6-17. Sequência de fases entre a montagem e desmontagem de árvores no processo de cromagem	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Interação entre parâmetros de entrada e saída do processo de cromagem	45
Tabela 2. DOE (Programa estatístico Minitab)	46
Tabela 3. Classificação de diferentes aspetos observados na camada de Crómio dos provetes de ensaio	57
Tabela 4. Refugo relativo a lascas	60
Tabela 5. Ensaio de confirmação	67
Tabela 6. Análise metalográfica	67
Tabela 7. Refugo relativo a lascas final.....	68

SIMBOLOGIA E SIGLAS

E	Módulo de Elasticidade
SIPOC	<i>Supplier</i> (Fornecedor), <i>Inputs</i> (Entradas), <i>Process</i> (Processo), <i>Outputs</i> (Saídas) e <i>Costumers</i> (Cliente)
ISO	Organização Internacional para Padronização
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DQS	Departamento Alemão de Qualidade
FCT-UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
DPMO	Defeitos Existentes num Milhão de Oportunidades
FMEA	<i>Failure mode and effects analysis</i>
SiF ₆	Fluorite
MSA	<i>Measurement Systems Analysis</i>
DOE	<i>Designs of Experiments</i>
DC	Corrente Contínua
CrO ₃	Óxido de Crómio
CRIII	Crómio Trivalente
CRVI	Crómio Hexavalente
I	Densidade de corrente
d	Intensidade de corrente
S	Área de superfície
h	Altura de árvore

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi realizado no âmbito de uma dissertação de mestrado. Consistiu no estudo de um processo de cromagem de segmentos de pistão e teve como objetivo melhorá-lo. Este trabalho foi efetuado em colaboração com a empresa MAHLE Componentes de Motores S.A – especializada na produção de segmentos de pistão; analisando a atividade/realidade da empresa e refletindo acerca dos seus problemas atuais, decidiu-se estudar o processo de cromagem dos segmentos de pistão produzidos pela empresa, uma vez que existe um número considerável de peças que são desperdiçadas por não apresentarem as características/qualidade necessária para serem vendidas. Uma das razões que está na origem dos desperdícios de segmentos no final da produção são as lascas na camada de revestimento. Lascas são pequenos arrancamentos da camada de Crómio do substrato, normalmente situadas junto às arestas. Podem surgir por vários motivos, tanto durante a vida de trabalho dos segmentos – e neste caso causar graves danos no motor- como durante a produção dos mesmos- aumentando o refugo de peças. Estas lascas traduzem a elevada dureza da camada, propriedade crítica do produto. O objetivo deste trabalho prendeu-se então com a tentativa de otimização desta propriedade da camada de revestimento dos segmentos – camada de Crómio.

Cumprindo todos os requisitos impostos, se se conseguir reduzir o número de lascas nos segmentos, o refugo final será menor. Isto naturalmente traduzir-se-á num aumento de lucro final: para uma produção de 35 mil segmentos diários, uma redução de apenas um por cento do valor actual de refugo resultará num aumento de produção de cerca de 350 segmentos diários.

Com a otimização da dureza será possível aumentar a velocidade de retificação e reduzir o desgaste dos materiais de trabalho, aumentando deste modo a produtividade. Para além disso, será possível corresponder às expetativas dos clientes que, ao longo dos anos, têm vindo a exigir uma durabilidade ao par segmento-revestimento cada vez maior, estando

atualmente no valor de durabilidade mínimo de um milhão de quilómetros, em condições de serviço bastante exigentes.

Os segmentos que se discutem são peças que são submetidas a grande desgaste na superfície de contato com as paredes da camisa do cilindro. É portanto capital prover as faces de trabalho destas peças com um material de elevada dureza de forma a reduzir os coeficientes de atrito, acautelando-se o aparecimento de falhas catastróficas ou mesmo a gripagem do motor. Neste sentido tem-se vindo a aplicar revestimentos cada vez mais evoluídos como PVD ou camada nitretada, de modo a melhorar as propriedades mecânicas do revestimento do produto [7].

Para realização deste estudo, e recorrendo à metodologia Seis Sigma, começou-se por perceber que parâmetros do processo de cromagem teriam mais influência na dureza. Com estes parâmetros foi desenhado o ensaio experimental: primeiramente foram feitos ensaios mecânicos em provetes cromados com diferentes programas de cromagem em que se fizeram variar os parâmetros em estudo. Depois, cromaram-se segmentos de produção normal com programas de cromagem com parâmetros semelhantes aos programas dos ensaios anteriores e foram analisados o número de lascas. Analisaram-se os resultados e foram retiradas conclusões que se apresentam mais à frente.

Começa-se por fazer uma pequena reflexão acerca das propriedades mecânicas do materiais e a importância do seu conhecimento em qualquer projecto de engenharia, faz-se uma pequena apresentação da empresa que colaborou neste trabalho, do seu produto, e do processo de cromagem e depois apresenta-se o procedimento experimental – metodologia utilizada, plano de ensaios e ensaios. Finalmente apresentam-se os resultados obtidos e as conclusões desta investigação.

2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Para se iniciar qualquer projeto, o engenheiro necessita conhecer e compreender as propriedades mecânicas dos materiais com os quais vai trabalhar. As propriedades dos materiais estão relacionadas com a sua composição química, estrutura cristalina e seus defeitos, com a natureza das ligações podendo ser metais (ferro, aço), ou não metais (vidro, tecido, borracha).

Existem dois grupos distintos de propriedades: propriedades físicas e propriedades químicas. As propriedades físicas determinam o comportamento do material em todas as circunstâncias do processo de fabricação e de utilização, e são divididas em propriedades mecânicas, propriedades térmicas e propriedades elétricas. As propriedades em que se centra este trabalho, e que por este motivo se aprofundam são as propriedades mecânicas.

Estas podem ser dureza, fragilidade, resistência, impermeabilidade, elasticidade, condução de calor, entre outras.

Antes de qualquer projeto de engenharia, todas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados devem ser verificadas e para isso são elaborados ensaios experimentais de laboratório para que os materiais atendam as exigências de serviço impostas. São retirados valores de grande importância como as tensões de cedência, tensão de rotura, tensão fratura, coeficiente de elasticidade entre outros para que nenhum dos materiais utilizados ceda perante os esforços submetidos.

Quando um material é sujeito a tensões superiores à sua tensão de cedência dá-se a passagem do estado de deformação elástica para o estado de deformação plástica. Durante a deformação elástica ocorrem pequenas extensões das ligações interatómicas o que permitem que após a aplicação da tensão as ligações voltem à sua posição inicial. Por outro lado após deformação plástica um grande número de átomos ou moléculas são movidos uns em relação aos outros e com a remoção da tensão, não retornam às suas posições originais.

Um material frágil é aquele que quando submetido a esforços não apresenta grande capacidade de se deformar e rapidamente passa do estado de deformação elástico para o plástico, fraturando-se.

No processo de cromagem tanto o material base como a camada de cobertura de Crômio devem apresentar propriedades específicas dependendo da função que desempenham. Por um lado o material base de que são feitos os segmentos (ferro fundido) é produzido com a mais alta tecnologia de fundição, de modo a preencher todas as qualidades mecânicas como por exemplo: resistir a esforços internos, compressão, tração, torção entre outros e para tal deve ter características mecânicas como a dureza, resistência, tenacidade, etc, para suportar todos os esforços requeridos.

A camada de Crômio não tem qualquer efeito perante os esforços internos no metal base, apesar de desempenhar um papel crucial perante os esforços externos (corrosão, atrito, choques).

3. MAHLE COMPONENTES DE MOTORES S.A.

A empresa MAHLE Componentes de Motores S.A, a qual será por vezes abreviadamente referenciada por MAHLE, aparece no início do século XX, como uma pequena oficina de fabrico de peças para automóveis sendo propriedade de dois irmãos, os irmãos Mahle. No ano de 1920 produzem pistões de liga e desenvolvem filtros de ar e óleo começando a dominar o mercado de componentes de motores. Pouco depois produzem o primeiro pistão com segmento de alumínio para motores a Diesel, e mais tarde os primeiros blocos europeus de motor em alumínio. A perseverança destes irmãos valeu-lhes o domínio do mercado de componentes automóveis.

A MAHLE é hoje uma multinacional alemã e conta com 160 unidades fabris distribuídas por 5 continentes, 7 centros tecnológicos (1 em Estugarda, 1 em Northampton, 2 em Detroit, 1 em São Paulo, 1 em Tóquio e 1 em Xangai) contando com cerca de 47.000 colaboradores.

Em Portugal dedica-se à produção de segmentos de pistão, e está situada perto de Coimbra, na zona industrial de Murte de e conta com cerca de 700 funcionários. Os principais objetivos da empresa são aumentar a ‘vida’ e fiabilidade das peças que produz e minimizar a necessidade de manutenção.

Desempenhando funções cruciais no rendimento do motor, os segmentos de pistão requerem uma análise, estudo e dedicação em que a MAHLE tem investido ao longo de todos estes anos e que a deixam no topo das empresas do sector automóvel a nível mundial.

Esta empresa é certificada segundo os mais elevados padrões de qualidade internacionais da indústria automóvel e tem como clientes as mais conceituadas marcas automóveis (figura 3.1). Relativamente à certificação a MAHLE tem implementado um sistema de gestão da qualidade certificado de acordo com a norma ISO/TS 16949:2002 (DQS) e o sistema de gestão ambiental certificado de acordo com a norma ISO/TS 16949:2002 (DQS).



Figura 3-1. Clientes MAHLE Componentes de Motores S.A.

Será relevante referir que a norma ISO/TS 16949 é uma Especificação Técnica que tem como objetivo demonstrar as exigências específicas para a aplicação da ISO 9001:2008 para a produção automóvel ou áreas afins (figura 3.2).



Figura 3-2. Certificação do sistema de gestão da qualidade

3.1. Produto

3.1.1. Definição do Segmento de Pistão

Os segmentos de pistão funcionam como uma mola circular metálica que, quando instalada nos cilindros dos motores, atuam como obstáculo entre a câmara de combustão e o cárter do motor. Estes são produzidos com grande precisão e qualidade pois estão projetados para suportar o funcionamento de um motor pelo menos durante um milhão de quilômetros.

3.1.2. Tipos de Segmentos de Pistão e Respetivas Funções

Nos motores de combustão interna, os segmentos de pistão têm três funções distintas:

- Vedar da câmara de combustão com ligação ao cárter, impedindo que os gases da combustão ou a pressão de compressão passem para o cárter.
- Transmitir o calor absorvido pela cabeça do pistão às paredes do cilindro, funcionando assim como um dissipador.
- Controlar o consumo de óleo lubrificante.

De modo a realizarem estas três funções utilizam-se três tipos básicos de segmentos de pistão: o de compressão, o raspador e o de óleo (figura 3.3)

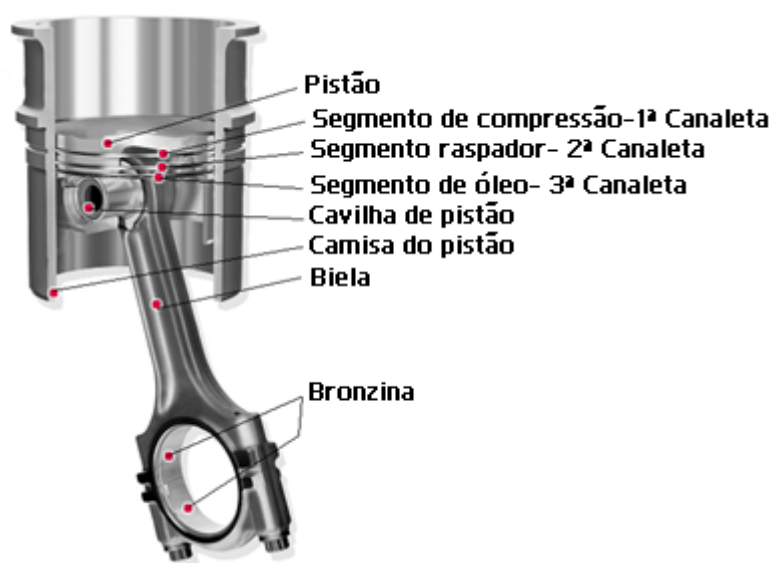


Figura 3-3. Tipos de segmentos

Os segmentos de compressão têm como objetivo principal vedar a câmara de combustão, impedindo que os gases da combustão passem para o cárter do motor, através da folga entre o pistão e o cilindro. Desta forma, evita-se a perda de rendimento do motor e a contaminação do óleo lubrificante. Para que isto aconteça é importante que ocorra, por um lado, o contacto total entre a face de trabalho do segmento e a parede do cilindro em toda a sua circunferência (exceto na folga entre pontas), por outro lado, o contacto perfeito entre as faces laterais do segmento e a face lateral da canaleta.

Os segmentos de compressão devem também igualmente impedir que o óleo lubrificante passe para a câmara de combustão deixando porém, um fino revestimento de óleo sobre a parede do cilindro de forma a reduzir o atrito entre os segmentos e o cilindro. Por último estes segmentos funcionam como alhetas, dissipando calor. Esta funcionalidade é muito importante pois a cabeça do pistão está diretamente exposta aos gases quentes da combustão, estando por isso sujeita a elevadas temperaturas. Se o pistão não tivesse esta possibilidade de dissipar o calor, poderia entrar em sobreaquecimento.

O segmento de arrasto ou raspador funciona por sua vez como uma junção entre segmento de compressão e o de óleo; tem como funções: a vedação entre a câmara de combustão e o cárter, a transferência de calor entre a cabeça do pistão e a camisa e o raspamento do excesso de óleo da parede do cilindro.

Por último os segmentos de óleo têm como objetivo primordial também raspar o excesso de óleo da parede do cilindro e drená-lo em direção ao cárter do motor, assegurando que permaneça uma película adequada de óleo, suficiente para lubrificar os segmentos de compressão.

3.1.3. Nomenclatura dos Segmentos de Pistão

Os segmentos de pistão (figura 3.4), apesar de parecerem simples e de arquitetura pouco complexa são sujeitos a inúmeras operações para adquirirem a geometria final apropriada. No fabrico dos segmentos de pistão, tal como em toda a indústria automóvel, devido à complexidade das peças, as características dimensionais relacionadas com tolerâncias, folgas, encaixes são muito exigentes e apertadas. Para cumprir com valores de todas as dimensões dentro das tolerâncias propostas, ao longo de todo o processo de produção, a

MAHLE dispõe de sistemas para identificar, avaliar e controlar as características do produto [16].

Apesar de um segmento parecer um simples anel, este apresenta uma complexidade extrema com vários aspetos que se devem verificar:

- **Faces laterais** – Também chamadas de “face superior” e “face inferior”, ficam paralelas à cabeça do pistão em contacto com as canaletas.
- **Face externa** – Também designada de “face de trabalho” ou “face de contacto”, corresponde à face do segmento que fica em contacto com a parede do cilindro.
- **Face interna** – Lado do segmento que fica voltado para a cabeça do pistão.
- **Altura** – Distância entre as faces laterais do segmento.
- **Espessura radial** – Distância entre as faces externa e interna do segmento.
- **Folga lateral** – Distância entre a face lateral do segmento e a superfície lateral da canaleta.
- **Diâmetro nominal** – Diâmetro externo do segmento, “fechado” ou confinado no diâmetro do cilindro de pistão para o qual foi projetado.
- **Folga entre pontas** – Distância entre as extremidades do segmento, quando instalado no cilindro de diâmetro correspondente.
- **Força tangencial** – Força que o segmento faz ao expandir-se quando instalado num cilindro.
- **Conformidade** – Capacidade que um segmento tem de adaptar a sua face de trabalho aos contornos de um cilindro em toda a sua circunferência, mesmo que a superfície de cilindro esteja ovalizada.

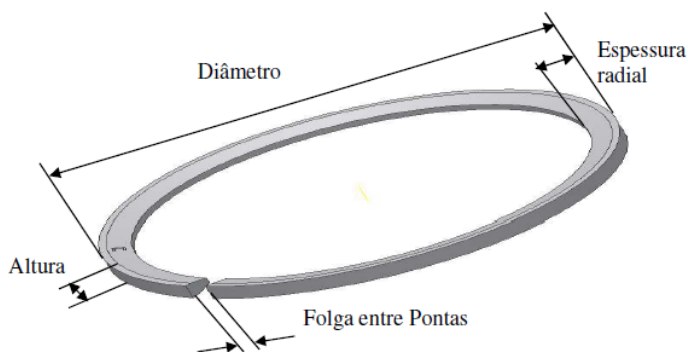


Figura 3-4. Nomenclatura de um segmento de pistão

3.1.4. Processo de Fabrico

A MAHLE em Portugal como foi referido anteriormente, está direcionada exclusivamente para a produção de segmentos de pistão. Para dar resposta às variadas encomendas, esta fábrica apresenta uma evoluída e elevada quantidade de máquinas que, trabalhando 24 horas por dia e 230 dias por ano, produzem cerca de 200 mil segmentos diários. Isto representa aproximadamente 46 milhões de segmentos por ano. Estes valores elevados de produção requerem diariamente uma qualificada e complicada gestão de pessoal, manutenção de máquinas, planeamento de produção, entre outros, para que todas as normas de segurança, ambientais, qualidade e higiene sejam aplicadas e respeitadas no processo de produção de peças.

Desde que o material base chega à fábrica até ao carregamento dos segmentos prontos em camiões para serem entregues ao cliente, são efetuados vários processos. O segmento que é objeto deste estudo, é um segmento de compressão que no seu processo de produção, passa por, pelo menos, 21 estações. Todas as estações estão constantemente sob controlo e após cada operação os segmentos são analisados de modo a verificar os parâmetros supostos para essa estação. No caso de não corresponderem ao especificado, a operação é analisada e refeita.

O ferro fundido de que são feitos os segmentos em causa, chega à fábrica sob a forma de uma argola achatada com as dimensões ligeiramente superiores às dimensões finais (figura 3.5).



Figura 3-5. Processo de manufatura: a) Segmento no início do processo de produção; b) Segmento no final de processo de produção

As primeiras três estações são as de retificação dos diâmetros interno e externo e abertura do *gap*, seguindo-se das retificações do chanfro, faces laterais e perfil.

Depois das cotas dos segmentos serem retificadas, estes vão para a linha de cromagem onde recebem durante algumas horas, mergulhados em Crómio, a camada que lhes vai permitir resistirem ao desgaste e corrosão durante a sua vida útil.

Após estas horas os segmentos são desmontados das árvores onde foram cromados e seguem o seu caminho de produção por mais uma série de processos de forma a adquirirem os parâmetros requisitados pelos clientes.

O processo que se segue é a retificação cilíndrica em que, com os segmentos empilhados, numa máquina fresadora, estes adquirem o diâmetro interno e externo especificado. Em seguida, nos segmentos é feita uma abertura com uma cota específica, são lapidados e ainda submetidos a uma retificação de chanfro externo antes da inspeção final. (figura 3.6).

Se o segmento não apresentar qualquer defeito e se todas as cotas estiverem dentro do especificado, é identificado individualmente através de um laser marcador, de acordo com o desenho e especificações para cada tipo de peça/cliente final.

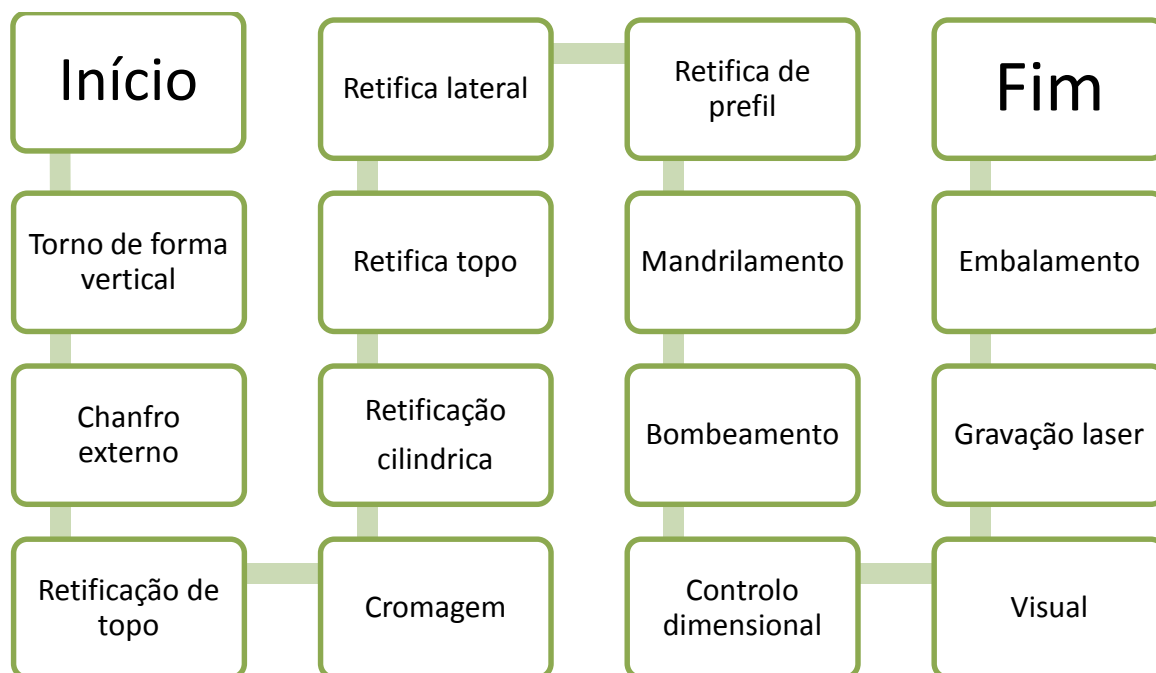


Figura 3-6. Diagrama de operações do processo de manufatura de segmentos de pistão

3.2. Cromagem

Com a evolução da utilização de técnicas de deposição de camada cada vez mais evoluídas foi possível produzir “Novos Materiais” com propriedades substancialmente diferentes daquelas obtidas pelos processos de fabrico tradicionais.

Para proteger a face de trabalho (face de contato), a MAHLE utiliza três tipos de processos de revestimento: cromagem, nitratação e PVD (Physical Vapor Deposition), sendo o processo de cromagem o objeto de investigação envolvido neste trabalho.

3.2.1. Tipos de Cromagem: Decorativa e Funcional

Vulgarmente consideram-se 2 tipos de cromagem: a cromagem decorativa e a cromagem funcional (figura 3.7).



Figura 3-7. Crómio funcional (à esquerda); Crómio decorativo (à direita)

A cromagem decorativa é mais económica que a funcional; Confere ao material cromado um bom acabamento de cor azul esbranquiçada, proveniente da eletrólise dos iões de Crómio hexavalente (CrVI), com boas características decorativas. É possível aplicar este tipo de cromagem em qualquer tipo de material incluindo plásticos, necessitando apenas de uma fina camada de níquel entre a cobertura e o substrato. Devido ao seu elevado grau de toxicidade, o Crómio hexavalente tem sido substituído por Crómio trivalente (CrIII) com uma cor branca mas também com boas propriedades decorativas.

A cromagem funcional ou de Crómio duro é o ideal para aplicações funcionais uma vez que atribui ao material revestido extrema dureza e resistência à corrosão e ao desgaste.

Para este tipo de cromagem ainda não existe tecnologia que utiliza o Crômio trivalente como cobertura sendo o hexavalente o utilizado.

Existem três tipos de banhos de cromagem funcional: o banho convencional, o *mix catalyst*, e o *high-speed*. Todos utilizam o trióxido de Crômio (CrO_3) como ingrediente principal e o ácido sulfúrico como catalisador, porém com diferentes concentrações. No caso do banho *mix-catalyst* também é utilizado a fluorite (SiF_6^{2-}) como catalisador, o que aumenta em grande escala a aderência da camada depositada; Este composto tem a particularidade de atacar todas as áreas de aço expostas existentes no banho, acelerando a velocidade de contaminação do banho. Na cromagem *high-speed* é ainda adicionado um catalisador orgânico. Estes três tipos de banhos são selecionados dependendo da velocidade e do custo que se pretende despendar.

A estrutura interna da camada de Crômio em cada tipo de cromagem (decorativa ou funcional) é diferente; Na cromagem decorativa a camada apresenta uma estrutura nodular bem organizada. Na cromagem funcional a cobertura apresenta maior espessura que a decorativa tendo esta uma estrutura dentada (figura 3.8). [10] [5] [8] [15].

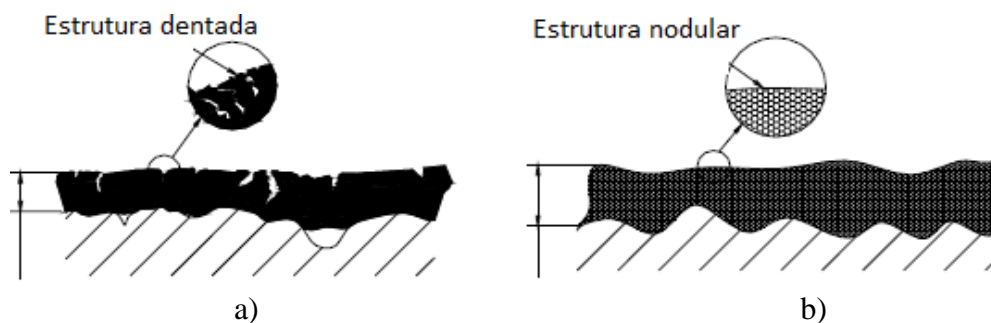


Figura 3-8. a) Cromagem decorativa com espessura entre 0,005-0,015mm [15] b) Cromagem funcional com espessura entre 0,013-0,038mm

3.2.2. Revestimento por Eletrodeposição

O processo em causa é um processo de cromagem por eletrodeposição, onde a peça passa inicialmente por uma série de banhos químicos controlados (lavagem, desgorduramento, jateamento, decapagem, ativação) com o intuito de remover impurezas, metais base ou apenas trabalhar a peça em bruto, sendo seguidamente emersa num banho de Crômio.

Diz-se eletrodeposição pois é necessário fornecer energia elétrica para que ocorra a deposição de íons no objeto (cátodo) que recebe o revestimento. Este é ligado ao polo negativo de uma fonte de corrente contínua e está emerso no metal que o vai revestir, enquanto um outro metal condutor (zinco ou cobre) funciona como (ânodo) ligado ao polo positivo. A corrente é fornecida por retificadores e assim cria uma diferença de potencial entre polos que leva a deposição dos íons de Crómio nas paredes do cátodo. Esta corrente varia de acordo com a camada que se deseja aplicar, tendo em consideração o diâmetro, comprimento e material da peça a ser cromada (figura 3.9) [12].

A eletrodeposição de uma camada de Crómio na superfície de trabalho dos segmentos de pistão confere-lhes uma excelente resistência ao desgaste abrasivo e uma boa resistência a escoriações. A resistência ao desgaste abrasivo de um segmento cromado pode ser três vezes superior a um segmento sem Crómio e estima-se que diminua o desgaste do cilindro em 50% [10].

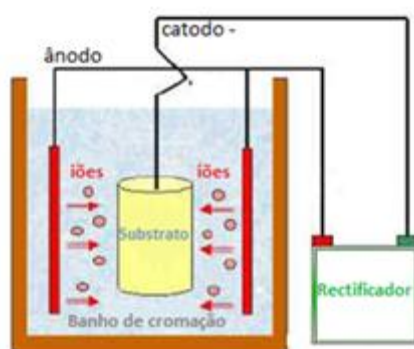


Figura 3-9. Tanque de cromagem

3.2.3. Linhas de Cromagem- Monocamada e Multicamadas

A MAHLE em Portugal conta com duas linhas de cromagem distintas: a linha de monocamada e a linha de multicamadas (figura 3.10).

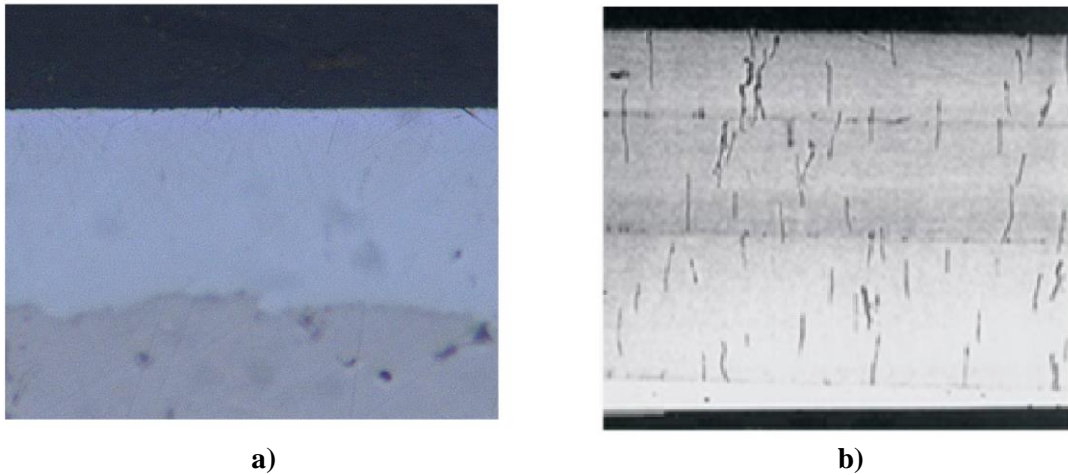


Figura 3-10. Camada de Crômio: a) Monocamada ; b) Multicamada

Apesar dos dois processos serem executados com o mesmo objetivo, existem várias diferenças entre linhas, nomeadamente no que diz respeito aos ingredientes utilizados, aos requisitos do banho e às camadas de Crômio depositadas. No caso da linha de monocamada, a camada é única, uma vez que o retificador imprime uma corrente de deposição constante ao longo de todo o processo de deposição.

Na linha de cromagem por multicamadas, o revestimento final é formado por várias camadas (visíveis ao microscópio), isto porque o retificador impõem alternadamente uma corrente de deposição e uma corrente de reversão; Com a aplicação cíclica destes valores de corrente, a camada de Crômio fica impregnada de partículas de cerâmica, que se depositam nas microfissuras existentes (figura 3.11). Este composto cerâmico, pela sua dureza e propriedades mecânicas, aumenta a resistência ao desgaste da camada e ao mesmo tempo opera como uma “âncora” às deformações da camada evitando que, com o funcionamento do motor, se vão obstruindo as fissuras.

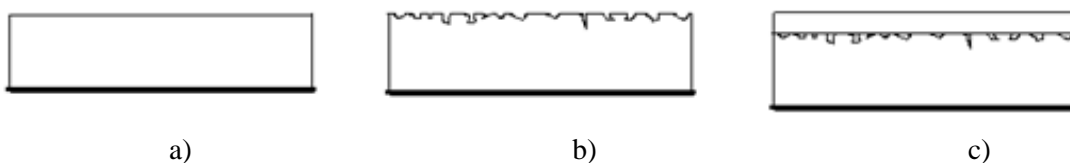


Figura 3-11. Sequência de deposição a) Deposição de Crômio; b) Reversão; c) Deposição da camada seguinte

A linha de cromagem aplicada aos segmentos de que trata este trabalho diz respeito apenas ao processo por multicamadas. Estas multicamadas, ao contrário da monocamada, possuem uma menor granulometria e uma menor densidade de microfissuras. As propriedades desta cobertura conferem aos segmentos um comportamento mais duro e uma boa capacidade de deformação plástica aumentando assim a resistência à propagação de fissuras [4] [1].

3.2.4. Equipamento da Linha de Cromagem

O equipamento numa linha de cromagem de multicamadas consiste em vários tanques com capacidade para tratar cerca de 600 peças em cada tanque, simultaneamente. Apenas uma parte dos tanques são especificamente para cromar (figura 3.12) sendo os restantes utilizados para tratamentos antes e após cromagem.

Estes tanques têm capacidade para duas árvores (300 segmentos cada), montadas verticalmente num suporte que é mergulhado nos mesmos tanque, onde permanecem até o processo terminar. Desde a entrada das árvores na linha de cromagem, todo o processo é monitorizado para que os parâmetros especificados de cada tanque se mantenham constantes e para que sejam cumpridos os tempos de permanência em cada estação.

Cada tanque de cromagem, para além da solução composta por Óxido de Crómio contém ácido sulfúrico, partículas de cerâmica, 16 barras de Chumbo com 7% de Estanho (que funcionam como ânodos) e um sistema de agitação e aquecimento.

Cada tanque está associado a um retificador que lhe fornece uma corrente contínua controlada por amperímetros, voltímetros e meios de regulação da tensão e corrente.



Figura 3-12. Tanque de cromagem

3.2.4.1. Ânodos

Os ânodos são, evidentemente, uma parte primordial e indispensável na eletrólise. Estes são utilizados na cromagem e são compostos maioritariamente por uma liga de Chumbo com cerca de 7% de Estanho (figura 3.13). A função do Estanho é a de operar como elemento de sacrifício, ajudando o ânodo a resistir à corrosão quando submerso no banho ácido. No caso de os ânodos serem puros (100% de Chumbo), uma reação com o banho originária uma lama de sal de Chumbo, o que dificultaria a troca iónica pretendida.



Figura 3-13. Ânodos

O posicionamento e a área dos ânodos são dois parâmetros importantes para uma deposição uniforme da camada. Por um lado, os ânodos devem estar posicionados de modo a que a projeção sob o substrato seja ótima, estando a sua posição relacionada com

a forma da peça a cromar. Por outro lado, as áreas dos ânodos estão relacionadas com as dos cátodos, sendo a razão entre elas 2:1 o que permite uma boa regeneração anódica do ácido crômico evitando a acumulação de Crômio trivalente no banho.

No caso da cromagem de segmentos de pistão, para cada árvore que transporta os segmentos, estão associados 8 ânodos. Estes estão dispostos dois a dois, como mostra a figura a baixo, à volta de cada árvore (cátodo) (Figura 3.14).

Cada ânodo está ligado pelo topo à corrente elétrica, que advém do retificador associado, de modo a criar a diferença de potencial que desencadeia a movimentação iónica [8].

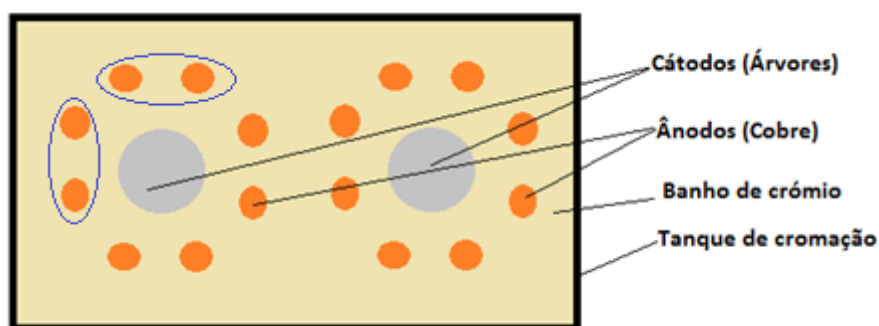


Figura 3-14. Posicionamentos dos ânodos relativamente aos cátodos. Planta do tanque de cromagem

3.2.4.1. Cátodo

No caso da cromagem de segmentos de pistão, as árvores que suportam os segmentos funcionam como cátodo. Nelas é aplicada a corrente elétrica que forma o campo elétrico entre o cátodo e o ânodo.

Tal como os ânodos, os cátodos requerem vários cuidados num banho de cromagem: Por um lado deve ser tido em conta o encaixe dos segmentos na sua estrutura e a posição das árvores em relação aos ânodos, por outro, o pré-tratamento (mecânico ou químico) a que os cátodos são sujeitos; O tratamento mecânico trabalha a face onde a camada se vai depositar, deixando-a o mais lisa possível, já que qualquer rugosidade é ampliada durante a deposição. O pré-tratamento químico é utilizado no caso de ser necessário minimizar o número de microfissuras da camada cromada ou de melhorar o acesso a pontos difíceis, no caso de o cátodo ter uma forma complexa. Após estes processos, o cátodo passa por

uma série de lavagens para remover qualquer resíduo superficial que possa impedir a deposição ou que possa reagir com a solução do revestimento.

3.2.4.2. Retificadores

Os retificadores têm a capacidade de modificar a corrente elétrica podendo assim, tal como conversores eletromecânicos/eletrônicos, transformar corrente alternada em corrente contínua. No processo de cromagem é necessário uma corrente contínua. Para tal, utilizam-se então circuitos retificadores.

Nas duas linhas de cromagem está associado um retificador a cada tanque onde são imersas as árvores com os segmentos de pistão. Cada retificador tem de dimensão 1.5x1.5x1.3m. Para os 40 tanques de cromagem, estão instalados 80 retificadores, pelo que ocupam uma área significativa das instalações fabris.

Dependendo da espessura do revestimento que se pretende aplicar e também do tipo de camada (monocamada ou multicamadas), os retificadores impõem diferentes módulos de densidade de corrente (figura 3.15).

Apesar de a corrente aplicada ser maioritariamente uma corrente de deposição com valores constantes e positivos, esta sofre variações:

No início do processo de cromagem ocorre o chamado *etching*, onde é imposto um valor de corrente negativo durante poucos segundos com o objetivo de atacar o material base removendo qualquer impureza que lá exista.

Outra forma de aplicação de corrente é a corrente de reversão. Esta ocorre ciclicamente durante curtos espaços de tempo e tem como objetivo abrir microfissuras provenientes do alívio de tensões internas da camada de Crómio, permitindo que partículas de cerâmica existente no banho se depositem nelas.

Após o *etching*, aplica-se um pico de corrente com o objetivo de favorecer a rápida cobertura da superfície total do substrato. Seguidamente começa a deposição de Crómio no substrato.

Se a camada de cobertura é do tipo multicamadas, a aplicação de corrente é alternada, de deposição e de reversão em que o número de ciclos corresponde ao número de camadas pretendida [6].

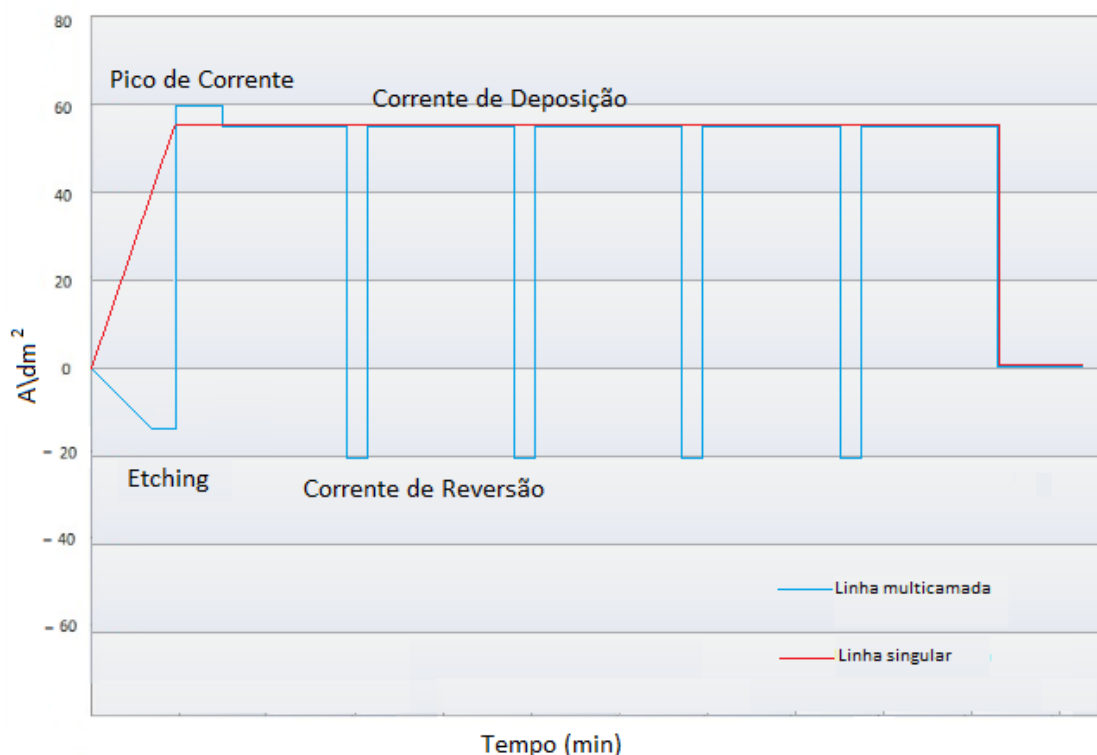


Figura 3-15. Densidade de corrente para a linha de monocamada e multicamadas. (Diagrama exemplificativo)

3.2.5. Fluxo da Linha de Cromagem

Após os segmentos passarem por várias fases de retificação, estes chegam à estação de cromagem. A linha em estudo como está referido anteriormente é de Crómio multicamadas, constituída por várias estações sendo que muitas destas estações assumem a mesma função (figura 3.16).

O tempo total de cromagem é de aproximadamente cinco horas estando contudo dependente da espessura de depósito que se deseja obter, bem como da densidade de corrente e da temperatura aplicada. A duração da cromagem não significa atraso para o fluxo da linha já que, devido ao número de tanques que existem a cromar em paralelo, é possível retirar duas árvores a cada dez minutos o que no caso de um segmento de 1,75 milímetros de altura corresponde a cromar a uma taxa de 140 segmentos por minuto.

As árvores são colocadas por um operador, duas a duas, num suporte que se movimenta ao longo de carris e que as leva até à estação destinada, controlado por um programa programado para tal. As primeiras paragens antes de cromar são as estações de desgorduramento e de limpeza (3 estações); Estas retiram da superfície do substrato qualquer gordura ou impureza provenientes de processos anteriores, que possam impedir a perfeita aderência da camada de Crómio. Após esta etapa os segmentos estão prontos para entrar no banho de cromagem.

Mergulhados os segmentos no banho, e após cromagem o suporte retira as árvores dos tanques e fa-las passar que por quatro fases de lavagem em quatro tanques diferentes. Estes tanques contêm agitadores de bolhas e propriedades específicas limpam a superfície cromada e retiram o excedente de Crómio que não aderiu ao substrato.

Depois destes processos de limpeza os segmentos passam à estação de redução de Crómio que tem como objetivo reduzir o Crómio hexavalente que não aderiu ao substrato, em Crómio trivalente, uma vez que o Crómio hexavalente livre é altamente cancerígeno.

As duas últimas estações da linha são a passivação e a desmagnetização. A primeira tem como objetivo cobrir o segmento com um filme protetor de modo a reduzir o risco de corrosão. A segunda tem como objetivo desmagnetizar os segmentos que, durante a cromagem, foram submetidos a elevadas densidades de corrente e nesta fase ainda se encontram eletricamente carregados [6].

No final deste complexo processo um operador retira e desmonta os segmentos das árvores para que os segmentos prossigam para outras etapas da sua produção.

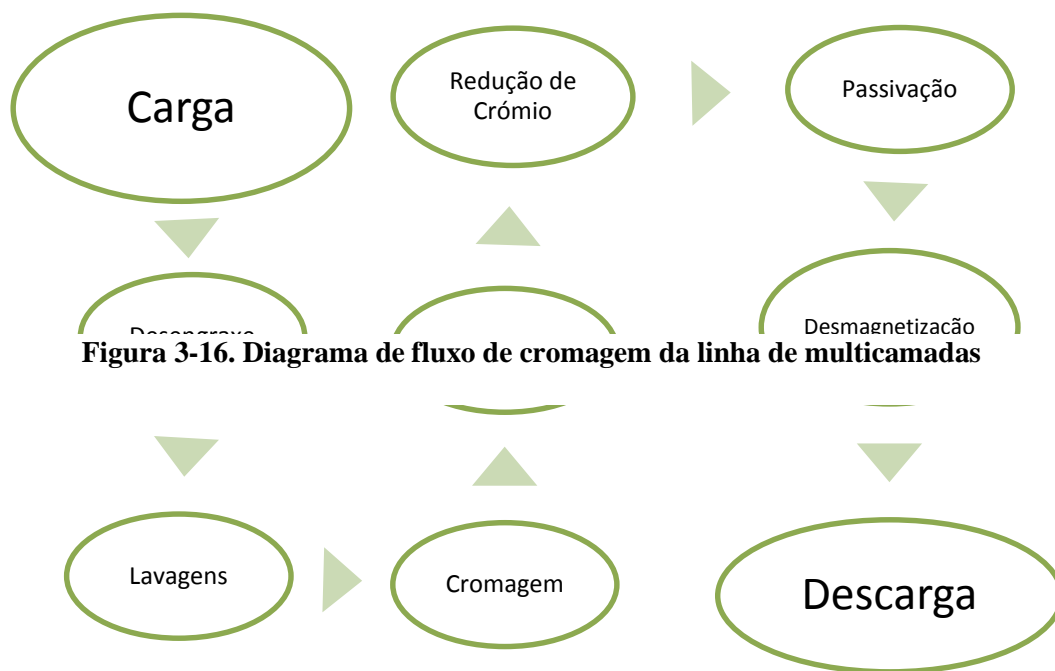


Figura 3-16. Diagrama de fluxo de cromagem da linha de multicamadas

3.2.6. Controlo das Variáveis de Cromagem

No processo de cromagem há inúmeros fatores que podem influenciar as características da camada. Após os níveis químicos do banho estabelecidos e toda a linha pronta para receber os segmentos é necessário definirem-se os valores das variáveis específicas para um processo (dependente do perfil do segmento, cliente etc) de modo a conseguir uma boa deposição da camada de Crómio no menor tempo possível. As propriedades primordiais a controlar são as densidades de corrente aplicada e a temperatura de cromagem do banho.

Quando falamos em transferência de corrente elétrica no processo de cromagem é conveniente falar de densidade de corrente (A/dm^2), considerando a área de superfície do eletrodo alvo. O fluxo de corrente e o potencial elétrico são monitorizados através do amperímetros e volímetros.

Tendo-se escolhido uma intensidade de corrente d , calcula-se a densidade de corrente necessária I recorrendo-se à fórmula:

$$I = d \times S$$

Em que S é a área da superfície a cromar que no caso dos segmentos é dada por:

$$S = 2\pi r \times h$$

Em que: r é o raio exterior dos segmentos e h a altura da árvore a cromar.

Relativamente à temperatura, um aumento desta conduz a um aumento da taxa de difusão e mobilidade dos iões. Isto resulta numa maior condutividade, o que facilita a deposição da camada no substrato. Contudo a temperatura não deve ser demasiado elevada pois por um lado reduz o número de microfissuras na camada de Crómio e impede a deposição de cerâmica entre elas mas por outro lado leva à evaporação/hidrólise dos constituintes do banho e deposição de aditivos orgânicos.

As variações de densidade das correntes oferecem dificuldades em manter a temperatura do banho sendo por isso utilizado um sistema de controlo de temperatura avançado para que os tanques permaneçam com os valores constantes.

Relacionando os parâmetros de temperatura e densidade de correntes e considerando as concentrações dos componentes do banho de Crómio, é possível delinear um gráfico de eficiência das correntes aplicadas (figura 3.17).

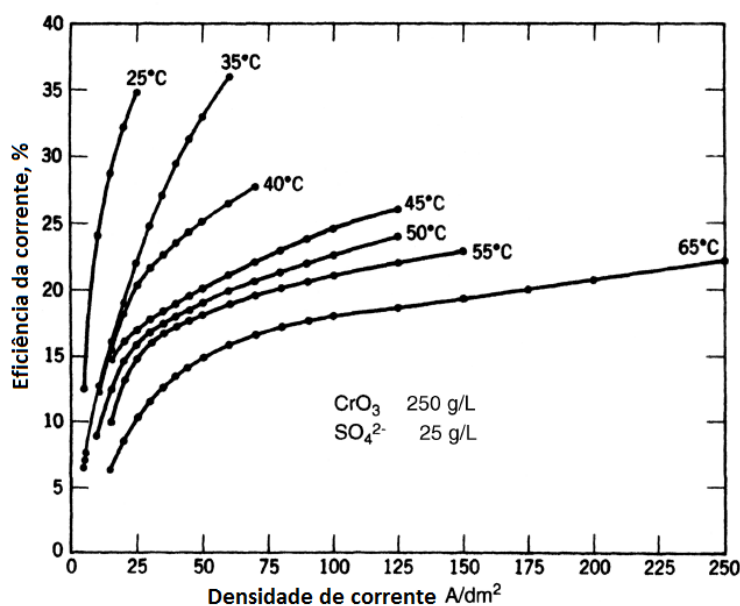


Figura 3-17. Gráfico de eficiência de densidade de corrente

Este gráfico permite-nos ver que por muito que se pretenda aumentar a densidade de corrente para aumentar a velocidade de deposição se a temperatura não for aumentada não se proporcionam as condições ideais de condutividade elétrica pelo que não se consegue uma boa eficiência. Por outro lado, no caso de cromagem de segmentos de pistão, há requisitos por parte dos clientes como dureza, espessura de camada ou tamanho de grão, que não permitem cromar com os parâmetros que oferecem a melhor eficiência.

4. MELHORIA CONTINUA- METODOLOGIA SEIS SIGMA

4.1. Melhoria Contínua na MAHLE

A exigência dos consumidores relativamente à qualidade dos produtos e serviços levaram as empresas a reunir-se e a trabalhar em grupo, conduzindo, assim, a filosofias de melhoria contínua e à redução de custos.

Tanto a ISO 9001 quanto o Seis Sigma recorrem a uma aproximação ao processo e sugerem uma visão do sistema global como pequenos processo interrelacionados de modo a focar os esforços no sentido de atingir resultados mais consistentes e previsíveis em cada processo individuais do sistema. Exemplo: No caso deste trabalho- de um sistema global de produção de segmentos, destacou-se em particular o processo de cromagem e dentro desse a dureza da camada, com o objetivo de que o resultado final fosse a redução do número de lascas processo geral de produção de segmentos.

Para cada situação a ser analisada existem alternativas de metodologias diversas. Portanto, é importante saber quais os problemas mais relevantes que ocorrem e, consoante a sua verdade, adaptar a melhor estratégia à sua resolução [9].

4.2. Seis Sigma

A metodologia Seis Sigma tem vindo a ser implementada em muitas empresas como estratégia para promover a melhoria do desempenho do negócio com uma filosofia centrada numa melhoria contínua do nível de qualidade dos produtos e serviços, incrementando a capacidade de inovação bem como a redução de custos e desperdícios [14].

O símbolo (σ) representa em estatística, o parâmetro para a dispersão denominado por desvio padrão. Quanto maior este valor, maior é a sua dispersão pelo que um valor alto é indesejável. Clientes e fornecedores exigem valores de sigma cada vez mais baixos de modo a aumentar a sua confiabilidade. As melhorias quantitativas no Seis Sigma identificam valores objetivos de Defeitos Existentes num Milhão de Oportunidades (DPMO) de 3 ou 4

unidades, isto é, aplicando ao caso em estudo, conseguir que por cada milhão de segmentos produzido, existem apenas 3 ou 4 com defeito de lascas na camada de Crómio [11].

A forma como a metodologia Seis Sigma aborda as situações em causa pode ser de uma forma estatística ou estratégica, analisando a influência de fatores que possam fazer variar processos como: orientação estratégica, alinhamento estratégico, medição, gerenciamento do desempenho organizacional, capacitação/especialização das pessoas, implementação e gerenciamento de projetos, ou uso de tecnologia de informação.

A metodologia obriga a um conhecimento geral da ferramenta em estudo por parte de toda a empresa para que, juntando a informação de todas as áreas de trabalho (engenharia, manutenção, higiene e segurança, mão de obra) se consigam recolher os aspetos mais influentes na situação em estudo, sob os quais se deve intervir no sentido de a melhorar.

4.2.1. Passos Seis Sigma

O Seis Sigma desenvolve uma estratégia orientada por 5 passos que são (figura 4.1):



D(*define*)- Definir o problema

M(*Measure*)-Medir a situação actual

A(*Analyze*)-Analisar o problema

I(*Improve*)-Melhorar a situação

C(*Control*)-Controlar a situação

Figura 4-1. Ciclo Seis Sigma

O primeiro passo é o de definir o processo chave a ser melhorado, sem esquecer todos os processos relacionados, de modo a que a alteração de um destes não altere negativamente outro. Por outro lado, deve-se estabelecer os limites de atuação indicando todos os preliminares, metas e resultados esperados, pelo que se recorre a ferramentas como indicadores de resultados, mapas de processos e cronogramas.

Depois da definição do problema, o passo seguinte é a medição em que, com o auxílio do mapa de processos, se identifica as causas críticas e se recolhe dados. A análise destes irá permitir estabelecer uma meta final.

Após a obtenção dos resultados e das causas críticas, recorre-se a ferramentas como Benchmarking, FMEA (*Failure mode and effects analysis*), MAS (*measurement systems analysis*), DOE (*Designs of Experiments*), entre outras, para identificar as variáveis de entrada que mais afetam as variáveis de saída.

O passo seguinte é o de identificar, priorizar e implementar soluções de modo a verificar a eficácia das mesmas. Estas variações são feitas através das ferramentas indicadoras de resultados, nomeadamente o FMEA e um plano de ação de melhorias.

Por último, com ferramentas como *Poka Yoke*, CEP, etc, estabelece-se o modo de controlo que garante a eficácia das ações implementadas no tempo. O processo é monitorizado para assegurar que não ocorrem mudanças inesperadas.

O Seis Sigma é considerado uma metodologia eficaz, mas de aplicação restrita, porque exige grandes recursos humanos e financeiros que estão ao alcance de apenas algumas organizações [2].

4.2.2. Análise DOE

A técnica DOE (*Design of Experiments*) é utilizada para auxiliar a metodologia Seis Sigma e é normalmente aplicada durante a fase de *Analyse* e *Improve*. É utilizada com o intuito de melhorar o desempenho do processo. Nestas fases a equipa procura a melhor solução para resolver o problema em causa e para isso desenvolve e testa possíveis planos de ação.

Depois de sessões de *brainstorming* para gerar diagramas de causa-efeito, o passo seguinte é o desenho de experiências, que através do número de parâmetros e condições a estudar, desenvolve um plano de experiências, ou seja, a sequência de ensaios e os seus valores de modo a facilitar a análise e otimizar as variáveis.

Ferramentas como *brainstorming* ou gráficos de Pareto, ajudam na priorização dos parâmetros mais influentes e no final espera-se saber que impacto cada parâmetro de entrada tem nos parâmetros de saída.

O estudo é feito estatisticamente e analisam-se os resultados de modo a determinar a influência individual de cada parâmetro e as interações entre eles [2].

4.2.3. Análise do Processo- *Ishikawa*

A gestão da qualidade apresenta uma metodologia de análise que se baseie, na integração de técnicas e ferramentas que contribuem para a tomada de decisão fundamentada em fatos, e na melhoria contínua dos processos.

O diagrama causa/efeito, também chamado de Ishikawa ou espinha de peixe (devido a sua forma), consiste em uma forma gráfica usada como metodologia de análise para representar fatores de influência (causas) sobre um determinado problema (efeito).

Este divide o processo em 6 categorias de causa: Medida, materiais, mão-de-obra, métodos, meio ambiente e máquinas (figura 4.2). Assim facilita a compreensão de quais as variáveis que afetam as características do resultado final e, tal como a estratégia DOE, são elaborados em sessões de brainstorming ou seja, pensamentos e ideias que cada membro do grupo de discussão expõem sem restrições, democraticamente, com o auxílio de programas como FMEA ou MSA, que possuem (para todas as máquinas envolvidas os parâmetros), as possíveis falhas, causas e efeitos, quantificados consoante a frequência de ocorrência e severidade.

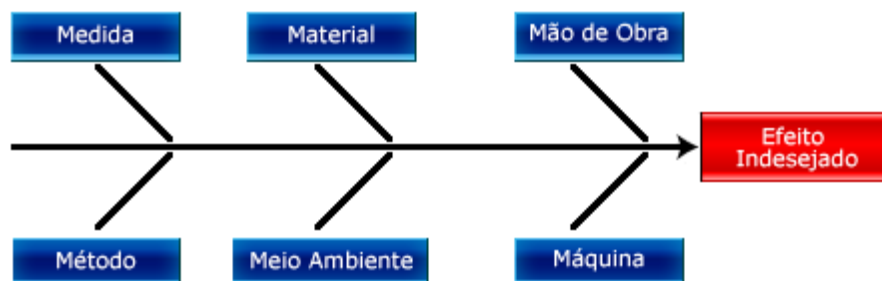


Figura 4-2. Diagrama Ishikawa ou de Causa/Efeito

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após um estudo teórico do revestimento e boa compreensão do processo em causa passou-se para a parte prática do trabalho. Foi necessário estabelecer passos e prazos de modo a não passar etapas e de maneira a concluir o estudo no tempo necessário. Para além disto, para que este trabalho fosse possível a MAHLE disponibilizou tempo de produção e equipamento, sendo por isso ainda mais crucial planear os passos de modo a otimizar materiais e tempo.

O trabalho experimental contou com várias fases distintas: Numa primeira fase passou pela determinação do problema e suas causas, recorrendo à metodologia Seis Sigma anteriormente mencionada. Em seguida estabeleceu-se soluções e efetuaram-se testes de produção e ensaios de laboratório.

No final do procedimento dependendo das conclusões que provierem da análises dos resultado, serão ou não implementadas as alterações no processo que foram estudadas.

5.1. Tipos de Ensaios Mecânicos dos Materiais

Para avaliar determinadas propriedades mecânicas dos materiais são realizados ensaios para reproduzir as condições de serviço a que esse material é sujeito durante a sua vida de trabalho. Os ensaios podem ser destrutivos, caso após este, a peça fique inutilizada ou não-destrutivos quando o ensaio não comprometa a integridade da peça.

Os ensaios mais utilizados na medição das propriedades mecânicas da camada de cobertura fina são: Ensaio de risco ou *Scracht test*, Nano-indentação e de Cratera ou *Ball Cratering*.

Scratch Test é um método rápido e eficaz para obter as cargas críticas que estão relacionados com propriedades de adesão do revestimento. Este ensaio consiste num estilete que é movido sobre a superfície de uma amostra com uma determinada carga, aplicada com direção normal e tangencial à superfície. A força normal pode ser aplicada de dois modos: com carga constante - resultado é obtido comparando-o com amostras referência- ou com aplicação

progressiva de carga até a falha ocorrer - os resultados são medidos em função da adesão do revestimento ao substrato, raio da ponta do estilete, taxa de carregamento, propriedades mecânicas do substrato e revestimento, distribuição do tamanho de falha, desenho descrito pelas fissuras na cratera, espessura e distância entre fissuras, e atrito entre a ponta do estilete e o revestimento (figura 5.1).

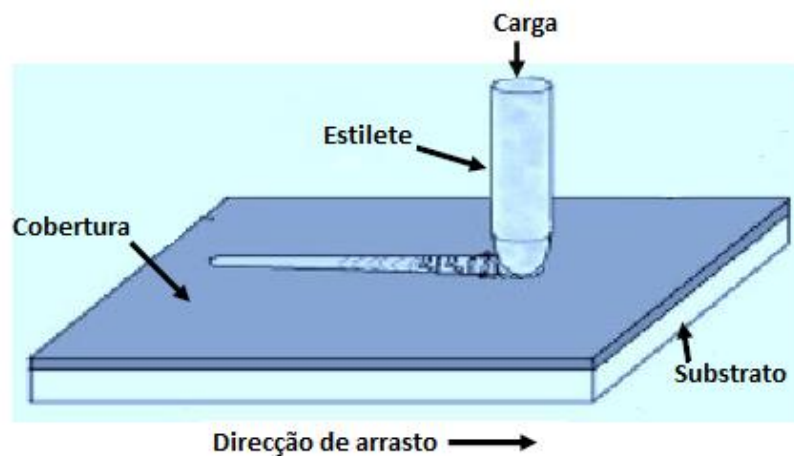


Figura 5-1. Scratch test. Figura adaptada [13]

O ensaio de Nano-indentação consiste em pressionar uma ponta extremamente afiada, com um certo perfil e uma certa carga, sobre a superfície de uma amostra. Através dos valores da carga aplicada e deslocamento, podem ser retirados não só valores da dureza do material como também resistência à fratura, fragilidade e delaminações na periferia da indentação. (figura 5.2).

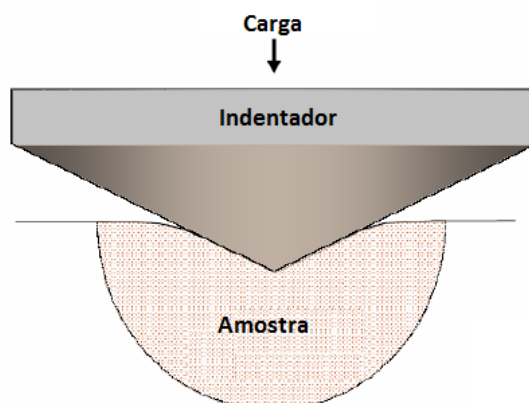


Figura 5-2. Nano Indentação

Por sua vez, o ensaio de *Ball Cratering* é um método muito simples, normalmente utilizado para avaliar a espessura de camadas finas. Este consiste em fazer uma pequena cratera na camada do revestimento com uma esfera de geometria conhecida que exerce uma força normal à amostra em estudo e um movimento de rotação (figura 5.3). Na cratera é constantemente aplicada uma solução abrasiva de diamante. Deste modo, analisando a secção transversal, permite calcular a espessura da camada fina, aderência de revestimento e a taxa de desgaste. Estes aspetos medem-se em função do diâmetro da esfera, peso e da aparência da superfície e periferia da cratera [13].



Figura 5-3. Ball cratering

5.2. Aplicação do Diagrama Causa/Efeito

Para determinar das causas e seus efeitos, primeiro passo da presente investigação, reuniram-se alguns trabalhadores da MAHLE de diferentes áreas como a engenharia, qualidade e produção com o objetivo de identificar os parâmetros com influência na dureza da camada de Crómio dos segmentos.

Chegou-se então a uma lista de parâmetros (indentificados na figura 5.4. como inputs) que se considera terem maior influência.

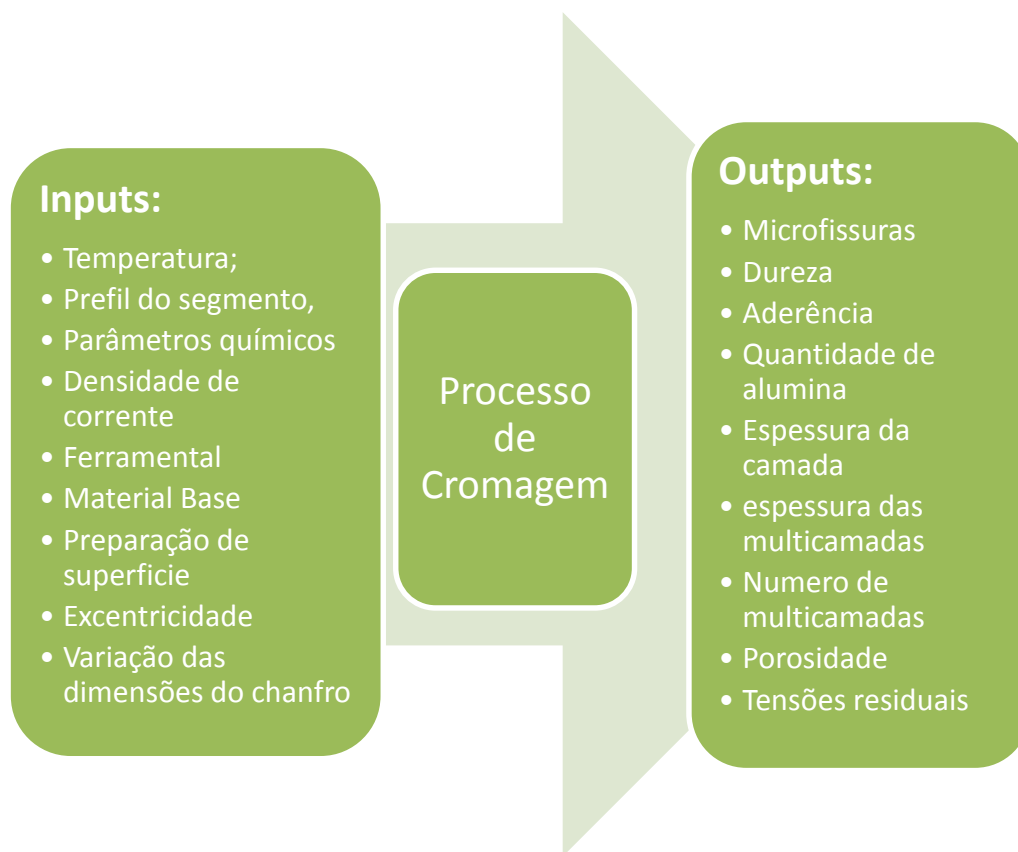


Figura 5-4. Parâmetros associados com fragilidade da camada de Crômio

O output do processo em estudo é a fragilidade que, não sendo quantificável, poderá estar relacionada com uma série de características. Identificaram-se então essas características da camada dos segmentos após a cromagem identificadas na figura acima como output. Estas estão relacionados diretamente com alguns parâmetros de entrada e são de mais difícil controlo influenciando também o aparecimento de lascas no revestimento.

Dos parâmetros identificados no passo anterior (*Inputs*), pretendeu-se selecionar os mais influentes na fragilidade da camada. Para tal foi elaborada, numa sessão de *Brainstorming*, uma matriz causa-efeito e procedeu-se à priorização de causas através de uma classificação em que se relacionou a influência de cada parâmetro de entrada nos parâmetros de saída. Esta classificação foi feita pela equipa anteriormente mencionada; consistiu na pontuação de 0 a 10 em que 0 significa ausência de influência entre parâmetros de entrada e de saída e 10 significa influência máxima (tabela 1).

Tabela 1. Interação entre parâmetros de entrada e saída do processo de cromagem

	Lascas	Microfissuras	Dureza	Aderência	Conteúdo de alumina	Espessura de camada	Espessura de multicamadas	Nº Multicamadas	Porosidade	Total
Temperatura	4	10	10	10	8	2	2	0	10	56
Perfil do anel	8	0	0	2	0	2	2	0	10	24
Parâmetros químicos	4	4	4	8	4	8	8	0	10	50
Densidade de corrente	8	10	4	4	8	10	10	0	10	64
Ferramental	4	2	2	2	2	2	2	0	2	18
Material Base	8	0	0	10	0	0	0	0	0	18
Preparação da superfície	8	0	0	10	0	0	0	0	0	18
Excentricidade	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Variação da dimensão do chanfro	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10

Após a classificação da influência de cada parâmetro, somados os valores obtém-se os parâmetros que mais influenciam a dureza (fragilidade) da camada, sendo estes, os que, foram estudados posteriormente.

Na tabela acima pode-se observar que os três parâmetros que parecem ser preponderantes são a temperatura, a densidade de corrente e os parâmetros químicos. Uma vez que os parâmetros químicos foram estudados anteriormente, o estudo incide sobre os parâmetros de temperatura e densidades de corrente sendo este último dividido em dois: densidade de corrente de deposição e densidade de corrente de reversão. Esta divisão está relacionada com o facto de a linha de produção em estudo ser uma linha de cromagem por multicamadas, onde não é apenas aplicada a densidade de corrente de deposição mas também a densidade de reversão.

5.2.1. Planeamento de Experiências

Depois de retirados os parâmetros mais influentes na variação da dureza da camada cromada, utilizou-se o programa de estatística *Minitab* com o objetivo de desenhar um plano experimental. Foi escolhido o modo de experiências *Full Factorial Design* onde os parâmetros de temperatura, densidade de corrente de deposição e densidade de corrente de reversão foram relacionados entre si, intersectando-se em todas as combinações possíveis (Tabela 2).

Começou-se por introduzir os valores utilizados atualmente para cada um dos três parâmetros e, em seguida, para cada parâmetro, foi atribuído um valor de desvio padrão de modo a extrair dois novos valores para testar (um superior e um inferior aos atuais).

Introduziu-se então para temperatura, densidade de deposição e densidade de reversão os valores atuais de 64 °C, 80 A/dm² e 60 A/dm² respetivamente, com variações fruto de experiências de 2 °C, 5 A/dm² e 4 A/dm². Os valores de variação são valores com uma gama de variação cuidadosamente escolhidos para que não influenciem outras propriedades dos segmentos.

Com a aplicação do programa obteve-se então a matriz de experiências.

Tabela 2. DOE (Programa estatístico Minitab)

Provet	Temperatura °C	Densidade de deposição A/dm ²	Densidade de reversão A/dm ²
1	62	75	56
2	62	75	64
3	62	85	56
4	62	85	64
5	66	75	56
6	66	75	64
7	66	85	56
8	66	85	64

5.3. Ensaio Experimental

Este trabalho divide-se em duas partes:

Na primeira parte (capítulo 5.3.1) diz respeito ao estudo das características físicas das camadas de Crómio que revestem os segmentos. Estas características estudam-se em provetes cromados com parâmetros com os valores retirados da matriz DOE. Após os ensaios, serão analisadas e comparadas as imagens microscópicas das identações provocadas pelos ensaios, e deste modo tentou-se distinguir qual é aparentemente, a camada mais e menos frágil e ainda associa-la aos parâmetros de entrada utilizando o programa estatístico Minitab.

Numa segunda parte do trabalho (capítulo 5.3.2.) são cromados segmentos de produção com os parâmetros dos diferentes programas de cromagem que se utilizaram nos ensaios com provetes. Depois, é então contabilizado o número de lascas encontradas no final do processo de produção e deste modo saber-se-á se há relação entre a dureza e o aparecimento de lascas. Se houver relação será possível então cruzar a maior ou menor dureza com o aparecimento de lascas.

5.3.1. 1ª Parte- Ensaios Destrutivos efetuados no IPN

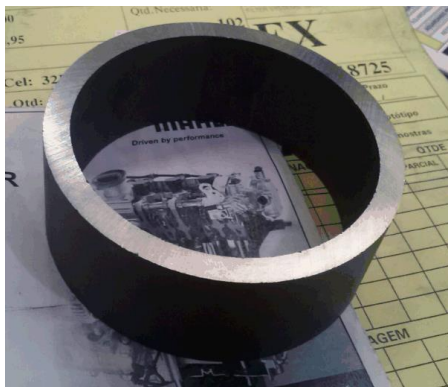
5.3.1.1. Maquinação dos Provetes para Ensaio

De modo a poderem ser feitos todos os ensaios pretendidos para o estudo da dureza da camada, foram maquinados provetes de ensaio do mesmo material mas com dimensões diferentes dos segmentos normalmente produzidos (figura 5.5). Para tal, foram concebidos provetes de ensaio com 30mm de altura, com as mesmas dimensões de diâmetro interno, externo e largura de *gap*. Deste modo foi possível, sem alteração de ferramental, a montagem dos provetes de ensaios em árvores tipicamente utilizadas neste processo.

A altura de 30mm comparada com a de um segmento normalmente produzido, com cerca de 1,75mm, deve-se a necessidade da realização dos ensaios de nano-indentação, *ball-cratering* e *Scratch Test* por parte do Instituto Pedro Nunes (IPN). Com uma maior área da face de

trabalho (face externa), maquinou-se duas superfícies planas, de dimensões 30x15mm, que, após cromagem, foram cortadas: uma serviu de amostra para enviar para o instituto IPN, e a outra que ficou como contraprova no caso de ser necessário executar novos ensaios.

Para além disso, após a cromagem, também uma secção dos provetes foi cortada e enviada para os laboratórios da MAHLE para serem avaliadas algumas propriedades mecânicas e químicas da camada de crómio, medidas em processo normal, de modo a assegurar todos os parâmetros especificados nas normas.



a)



b)

Figura 5-5. Provette para ensaio a) No início b) Antes de cromar

5.3.1.2. Montagem do Provette para Ensaio

Após maquinação dos provetes, a montagem dos mesmos nas árvores é um processo que requer alguma experiência. O provete foi montado exatamente no centro da árvore, sendo o restante preenchido com segmentos comuns (figura 5.6). Cerca de 100 segmentos envolvem o provete de ensaio, e com um sistema evoluído de aperto, os segmentos foram fechados e comprimidos por um par porca-parafuso que os impede de se separarem durante o processo de cromagem. É importante que o espaço entre as extremidades dos gaps seja mínimo e que os segmentos estejam perfeitamente alinhados para que não se dê o chamado “efeito sombra” na camada; O efeito de sombra é um fenómeno em que existe deposição de Crómio também nas faces laterais dos segmentos em vez de se depositar apenas na face de contacto.

Também nesta fase da montagem dos segmentos nas árvores, é importante, com o auxílio de um sistema de relógios apalpadores, medir a excentricidade dos segmentos. Este deve

verificar se os segmentos, quando fechados, estão perfeitamente circulares e concêntricos com o eixo da árvore.

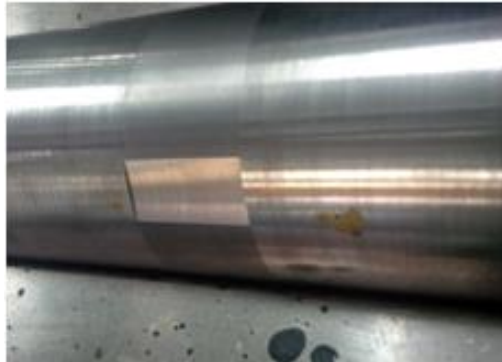


Figura 5-6. Montagem da árvore- Face plana do provete de ensaio

5.3.1.3. Ensaio

Em relação a esta etapa do procedimento experimental consiste na cromagem dos provetes segundo o processo normal sendo que apenas varia os valores dos parametros de temperaturas, densidade de corrente de deposição e reversão, conforme é apresentado na matriz de experiencias retirada do DOE (tabela 2).

5.3.2. 2ª Parte: Cromagem de Segmentos em Produção Normal para Ensaio

Na segunda parte deste trabalho foram então cromadas 8 árvores, com segmentos de produção normais, com parâmetros de valores iguais aos utilizados nos ensaios anteriores. Este ensaio, ao contrário dos ensaios dos provetes- que após cromados foram estudados relativamente às suas propriedades da camada- seguiram o percurso normal de produção até ao final.

No processo normal de produção os segmentos passam por várias estações de retificação, lapidação (acabamento) e lavagem; aqui são confrontados com diferenças de temperaturas, choques, tensões, torções onde por vezes dão origem as indesejadas lascas.

No final de todo o processo de produção foram contabilizadas as lascas existentes em cada árvore.

Neste processo, para evitar que fossem sacrificados segmentos para fazer Set up das máquinas por onde passaram, todo o processo foi feito juntamente com um lote de segmentos de produção normal estando os segmentos em estudo (devidamente identificados) distribuídos entre os segmentos “normais”. Deste modo, assegurou-se que não eram destruídos segmentos de estudos e que todos seriam contabilizados.

6. RESULTADOS

Após a decisão de se estudar os três parâmetros selecionados no capítulo 5.2 (Temperatura densidades de corrente de deposição e reversão), foram então cromados provetes teste, foram feitos os testes de *Scratch teste*, Nano Indentação e *Ball cratering*; os respectivos resultados foram depois cuidadosamente analisados. Numa segunda fase foram cromados segmentos de produção normal com diferentes valores de entrada e os resultados foram estatisticamente analisados também com o máximo rigor.

6.1. Resultados Fornecidos pelo Instituto Pedro Nunes (IPN)

Pela complexidade dos ensaios, impossíveis de efetuar no laboratório da MAHLE, estes foram feitos nos laboratórios do IPN. A complexidade dos ensaios deve-se à difícil quantificação da alta dureza (fragilidade) de uma camada fina. A avaliação e interpretação dos resultados assenta na análise e comparação entre as características de imagens das indentações (provocadas pelos ensaios) observadas no microscópio, tanto da zona de corte como da superfície da cratera dos diferentes ensaios no sentido de compreender a reacção do material à aplicação da carga.

6.1.1. *Ensaio de Scratch*

No ensaio de *Scratch* as observações foram feitas de duas formas: Através de um microscópio de alta resolução onde foi observada a superfície de indentação, e através de um Microscópio Eletrónico de Varredura (MEV) para observação do corte da camada afetada pela deformação (figura 6.1)

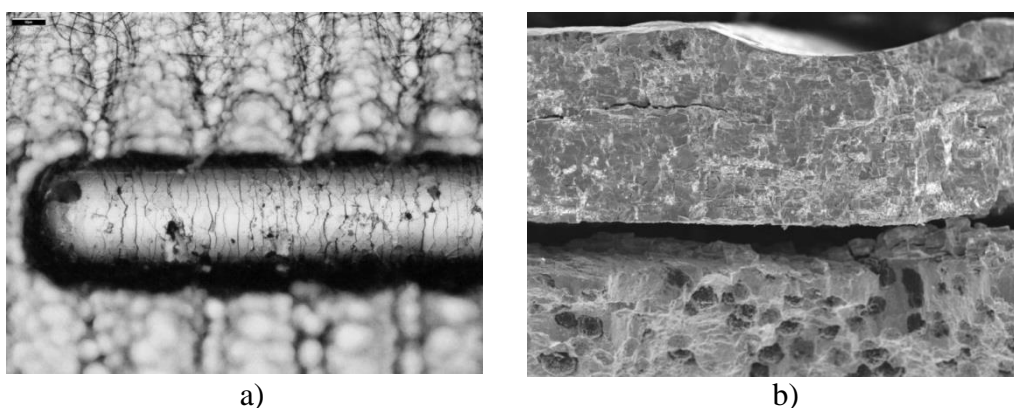


Figura 6-1. Scratch test- a) Planta da indentação; b) Corte da camada indentada- IPN

Na primeira figura pode observar-se a cratera originada pelo arrastamento do estilete ao longo da camada de Crómio, derivada da aplicação da carga progressiva até aos 200 N. Perante a carga criam-se tensões internas que aquando a sua libertação, formam fissuras com diferentes significados. Na indentação provocada pelo estilete é possível (a microscópio), observar dois tipos distintos de falhas: adesivas e coesivas dependendo da forma que apresentam em relação à direção do movimento do estilete (figura 6.2).

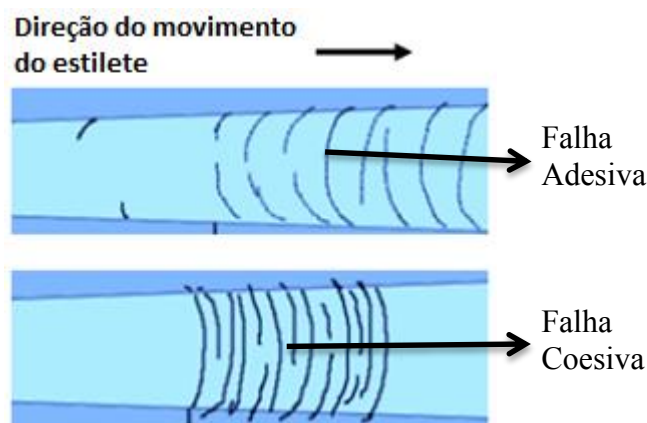


Figura 6-2. Tipos de falhas [13]

Os resultados dos ensaios efetuados nos provetes mostram que há falhas na camada de Crómio de ambos os tipos. O presente estudo centra-se principalmente nas falhas do tipo coesivo que são as que influenciam diretamente a ocorrência de lascas na superfície da camada.

Os ensaios mostram também que a espessura das fissuras está associada à dureza da camada; para uma camada menos frágil, a libertação de tensões internas origina fissuras finas ao

longo da cratera. Pelo contrário, para uma camada mais frágil, as fissuras têm larguras maiores (figura 6.3) e podem originar delaminações.

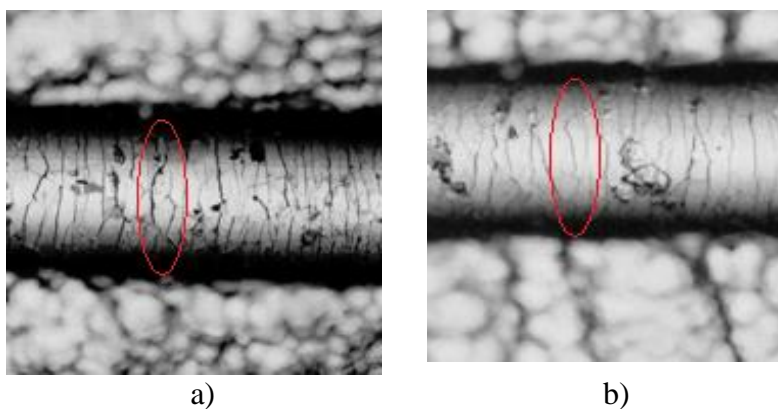


Figura 6-3. Ensaio de *Scratch*- a)Fissuras grossas; b)Fissuras finas- IPN

As delaminações são falhas coesivas e por isso, são as que melhor representam a reação de uma camada muito frágil quando sujeita ao ensaio de *scratch*. Estas surgem após a passagem do material do estado de deformação elástico para o plástico, em que num certo ponto se dá o destacamento completo e visível de secções de material do revestimento (figura 6.4).

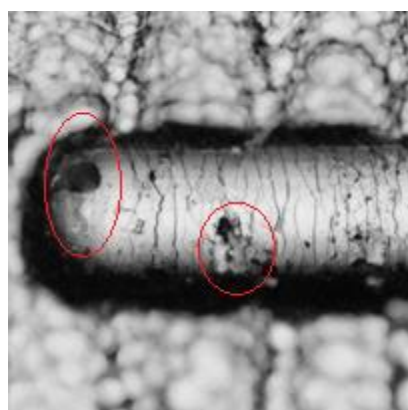


Figura 6-4. Delaminações-IPN

Nas imagens obtidas pelo MEV há vários aspetos relativamente à maior ou menor dureza. Para tal é necessário comparar a estrutura da camada antes e depois da indentação (figura 6.5).

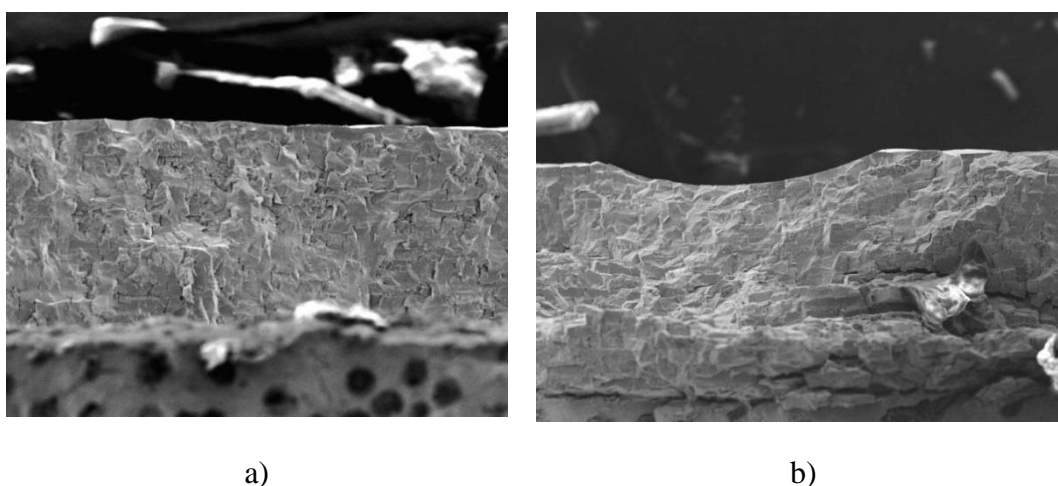


Figura 6-5. Imagens MEV- a) Antes da Indentação; b) Depois de Indentação- IPN

Existem quatro zonas onde se deve ter especial atenção para avaliação de indentações na camada (figura 6.6):

Zona 1- Superfície de contacto entre estilete e camada.

Zona 2- Camada até onde é possível ver a deformação relativa à carga aplicada.

Zona 3- Fronteira entre a camada de Crómio e material base.

Zona 4- Seguimento de camada fora da indentação.

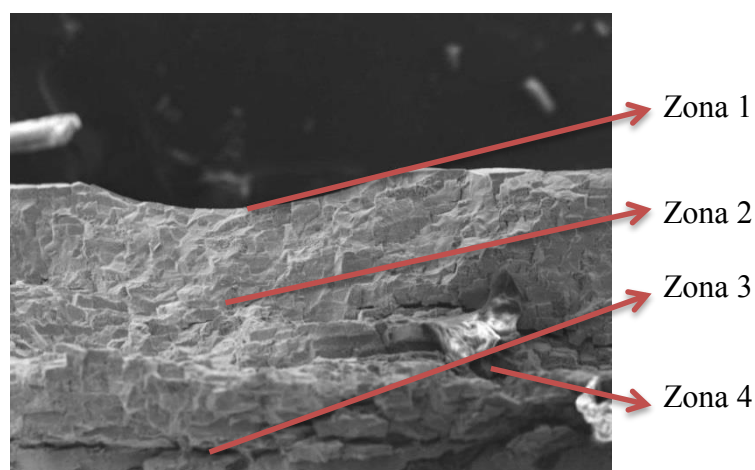


Figura 6-6. Zonas de análise- IPN

A zona 1 correspondente à superfície externa da camada e é onde o par ação/reação é maior, uma vez que esta zona contacta diretamente com o estilete. Aqui são exercidas forças normais à camada assim como tangenciais, originando por isso grande fricção entre

materiais. Esta fricção pode até originar arrancamentos de material que podem levar à fissuração da camada (figura 6.7).

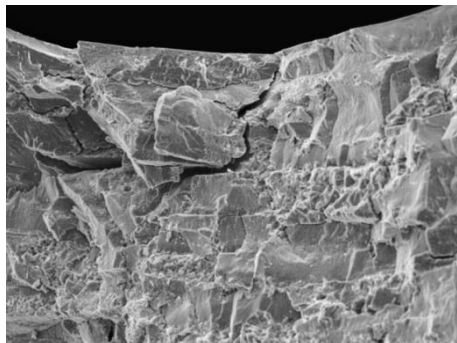


Figura 6-7. Zona 1- IPN

A zona 2 diz respeito à profundidade da camada até onde se verifica deformação. Nessa zona é possível observar a curvatura provocada pela carga imposta. Dependendo da dureza da camada, haverá curvatura de camadas até uma maior ou menor profundidade. As delaminações e deformações relevantes são portanto as encontradas nessa zona por ser a zona afetada. É importante distinguir as delaminações que se estendem paralela e perpendicularmente à camada (figura 6.8). Uma vez que é uma cobertura por multicamada as delaminações que ocorrem paralelamente à camada são relacionadas com a aderência entre camadas devido à força tangencial, enquanto as perpendiculares são mais representativas de rotura fragil.

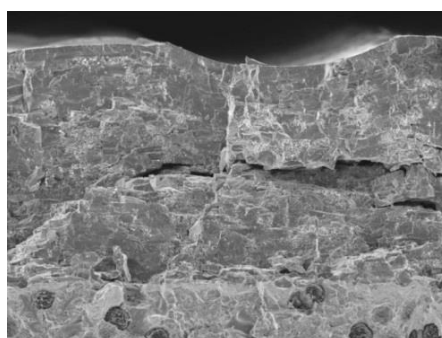


Figura 6-8. Zona 2- IPN

A zona 3 é menos importante para o estudo relativo ao aparecimento de lascas. Esta, por ser muito abaixo da zona 2 é pouco influenciada pela carga aplicada. Contudo, devido à força tangencial, no caso de ocorrer descolamento, pode avaliar-se a falta de aderência da camada

de Crômio ao material base (figura 6.9). Esta pode ser devida às falhas no tratamento superficial do material base, à preparação do provete para observação ou mesmo devido à falha de corrente no ataque inicial (*etching*).

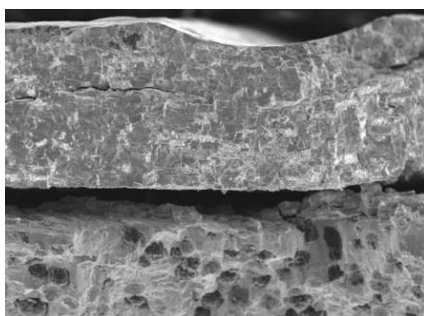


Figura 6-9. Zona 3- Falha de aderência- IPN

A zona 4 é uma zona não afetada diretamente pela carga- é também tida em consideração na avaliação de dureza. As delaminações existentes nesta zona podem não ser devidas à carga imposta, mas serem falhas já existentes anteriormente na camada que expandiram aquando a aplicação da indentação, dando origem a delaminações de grandes dimensões (figura 6.10). A expansão das falhas está por isso relacionada com a maior ou menor dureza. Comparando-se todas estas zonas pode-se chegar a um resultado mais preciso das propriedades da camada.

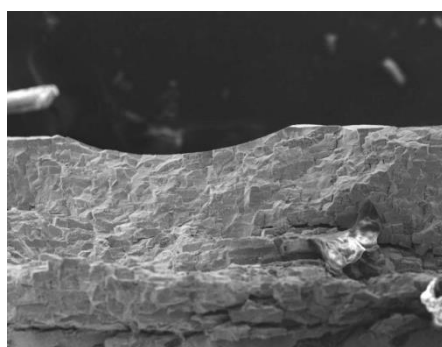


Figura 6-10. Zona 4-IPN

6.1.2. Quantificação da dureza da Camada de Crômio

O modo de quantificar a camada de Crômio quanto à sua dureza teve em conta várias características apresentadas anteriormente como:

- Número de fissuras
- Largura de fissuras
- Número de delaminações
- Extensão das delaminações
- Deformação observada na secção
- Aspeto geral

6.1.2.1. Tabela de Classificação da Influência que Diferentes Aspectos têm na Quantificação da Dureza

Para identificar/conhecer os aspectos que podem ter mais influência e serem mais úteis para quantificar a dureza das camadas, procedeu-se a uma classificação. Esta classificação foi semelhante à realizada no início deste estudo aquando da decisão das variáveis a estudar; juntaram-se 5 colaboradores da MAHLE que, através da estratégia de brainstorming, classificaram de 1 a 10 cada critério sendo que 1 significa que o critério está associado a maior dureza e 10 que está associado a menor (Tabela 3).

Multiplicados todos os valores de cada linha, de modo a ter uma maior discrepância, extraiu-se a resposta.

Tabela 3. Classificação de diferentes aspetos observados na camada de Crómio dos provetes de ensaio

Amostra	Nº Fissuras	Delaminações	Extensão	MEV	Visual global	Largura Fissuras	Resposta individual	Resposta coletiva
1	10	1	1	3	2	4	240	98
2	1	4	6	4	3	5	1440	2601
3	7	5	8	2	7	6	23520	9205
4	5	2	3	5	4	3	1800	921
5	9	2	4	1	1	1	72	527
6	3	10	10	8	8	7	134400	17480
7	6	7	7	7	5	8	82320	3692
8	5	4	9	6	6	2	12960	6724

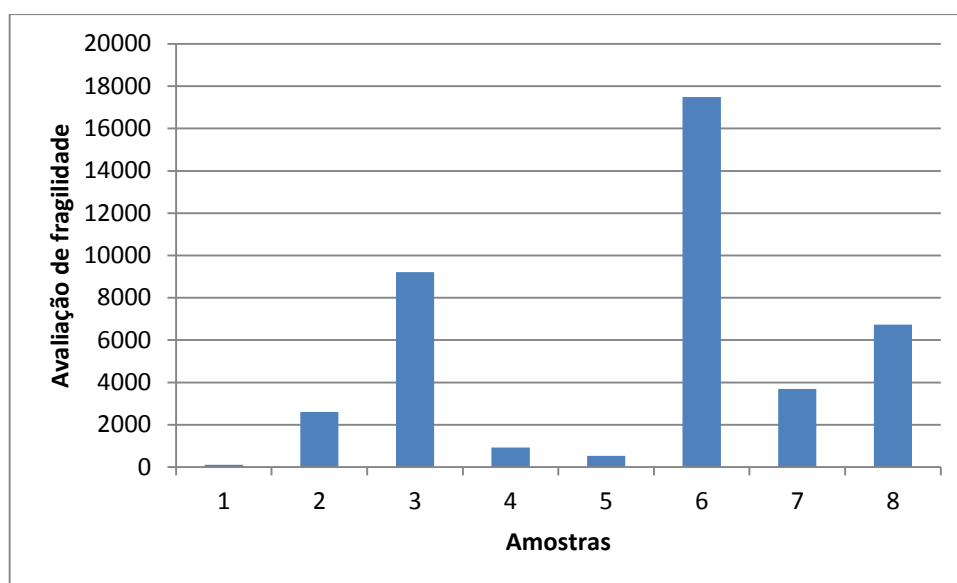


Figura 6-11. Gráfico do resultado da avaliação das características da camada.

Através dos resultados obtidos (figura 6.11) verificou-se que, teoricamente, as camadas mais frágeis são as correspondentes às amostras 3 e 6 com valores de temperatura, densidades de corrente de deposição e reversão de 62 °C, 85 A/dm², 56 A/dm² e 66 °C, 75 A/dm², 64 A/dm², respectivamente. Por outro lado, as amostras que teoricamente são menos frágeis são as 1 e 5 com valores de temperatura de 62 °C e 66 °C respectivamente e com densidades de corrente de 75 A/dm² e 56 A/dm² para as duas amostras.

Estes resultados são interessantes contudo não são totalmente conclusivos pois foram feitos através de uma avaliação visual estando por isso relacionada com o modo como cada avaliador interpreta o que observa.

6.1.3. Ball cratering

O resultado esperado do ensaio de *ball cratering* incide na observação não tanto do interior da cratera proveniente do desgaste, mas sim das características da periferia da mesma (figura 6.12).

Com o movimento de rotação da esfera standardizada, a fricção entre a esfera e a camada vai provocar o desgaste de material e os possíveis arrancamentos. Uma vez que para todas as amostras foi utilizada a mesma esfera, com velocidade de rotação e tempo de ensaio igual,

é possível, comparando imagem, retirar aspetos que apontem para uma maior ou menor dureza.

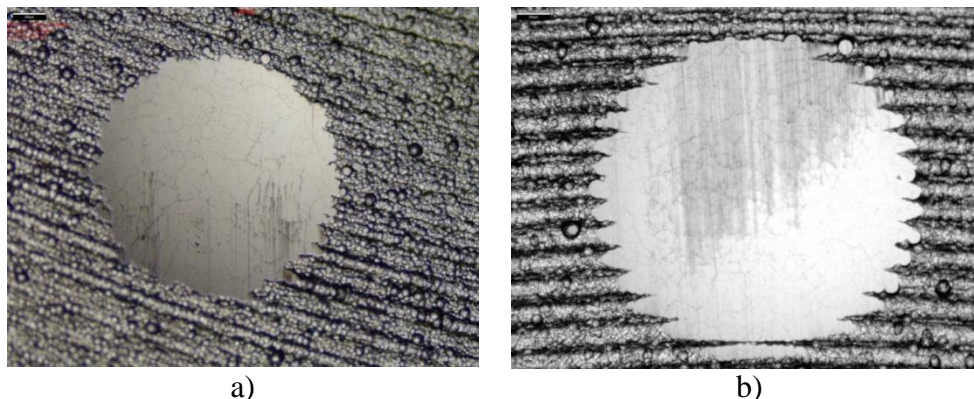


Figura 6-12. *Ball cratering*- IPN a) e b) Imagem captada de duas indentações

Perante os resultados, as conclusões não foram satisfatórias. Isto, deveu-se ao facto deste ensaio ser específico para camadas muito finas, requisito não presente nas amostras em estudo.

Quando observadas as imagens das crateras, não foi possível retirar informações relativas à diferentes durezas. As diferentes amostras apresentaram iguais crateras e acabamento das periferias semelhantes.

Os resultados numéricos obtidos foram de diâmetros da cratera e profundidade. Estes valores são pouco representativos de dureza representando melhor a dureza do material.

Outro dos objetivos do ensaio de *ball cratering* é medir as espessuras das diferentes camadas. Este valor apesar de ser já conhecido, através das análises efetuadas no laboratório da empresa, não foi possível observar na cratera resultante do ensaio. Para tal teria de se efetuar um ataque químico para diferenciar camadas e deste modo, através do diâmetro das circunferências traçadas na cratera, seria possível calcular a espessura.

6.1.4. Ensaio de Nano Indentação – IPN

Estes ensaios, apesar de terem sido começados, foram descontinuados uma vez que o tipo de ensaio – Nano Indentação – não era aplicável à amostra em questão.

Por não acrescentarem valor nem conteúdo a este trabalho, os resultados não são apresentados.

6.2. Resultado da Cromagem de Segmentos para Ensaio na Linha de Produção

6.2.1. Análise de Refugo

Uma vez que os resultados da primeira parte do projeto - relativos à avaliação da camada quanto à sua dureza – não foram conclusivos, cromaram-se 8 árvores com segmentos de produção normal. Seguindo a mesma sequência da matriz DOE, cada árvore constituída por 340 segmentos entrou na linha de cromagem com os mesmos valores de temperatura, densidade de corrente de deposição e reversão aplicados nos ensaios anteriores.

Após cromagem, seguiram o percurso normal de produção até à estação onde todos os segmentos são visualmente analisados. Dependendo dos defeitos observados estes são ou não aprovados.

Na tabela 4, abaixo representada, estão os resultados finais de refugo relativos ao número de lascas de cada árvore.

Tabela 4. Refugo relativo a lascas

Árvore	Temperatura °C	Densidade de Deposição A/dm ²	Densidade de Reversão A/dm ²	Quantidade	Lascas	%Refugo
1	62	75	56	340	62	18%
2	62	75	64	340	73	21%
3	62	85	56	340	107	31%
4	62	85	64	340	150	44%
5	66	75	56	340	94	28%
6	66	75	64	340	146	43%
7	66	85	56	340	68	20%
8	66	85	64	340	75	22%

Traduzido em gráfico:

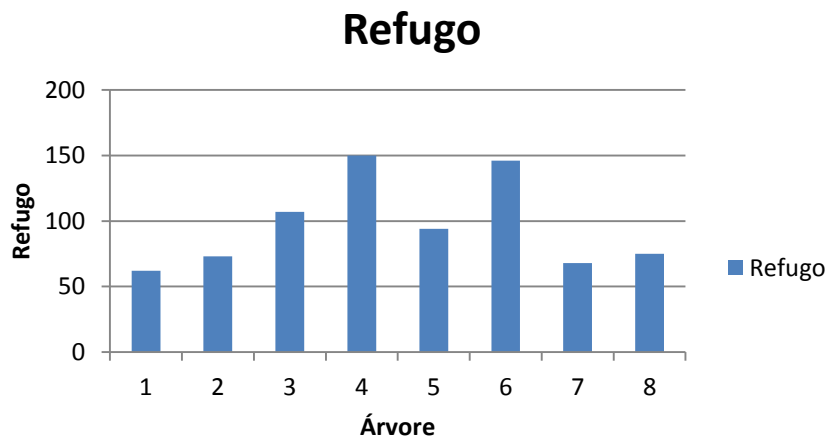


Figura 6-13. Gráfico relativo ao refugo final de segmentos com lascas

Com a análise do gráfico (figura 6.13) é possível verificar que nenhum dos ensaios nos permite ter refugo nulo relativo a lascas; A existência de lascas tem várias origens mas com estes ensaios, concluiu-se que os valores dos parâmetros de cromagem são sem dúvida uma das razões responsáveis por isso.

Verifica-se que o refugo mínimo diz respeito à árvore 1 e árvore 7 e que, por outro lado, se observa um número elevado de segmentos com lascas nas árvores 4 e 6. Comparando com a avaliação feita na primeira parte do trabalho (figura 6.14), sobrepondo os gráficos, é possível denotar semelhanças entre eles, levando-nos a afirmar que as diferenças observadas nas camadas de Crómio dos provetes de ensaios se relacionam com a existência de lascas.

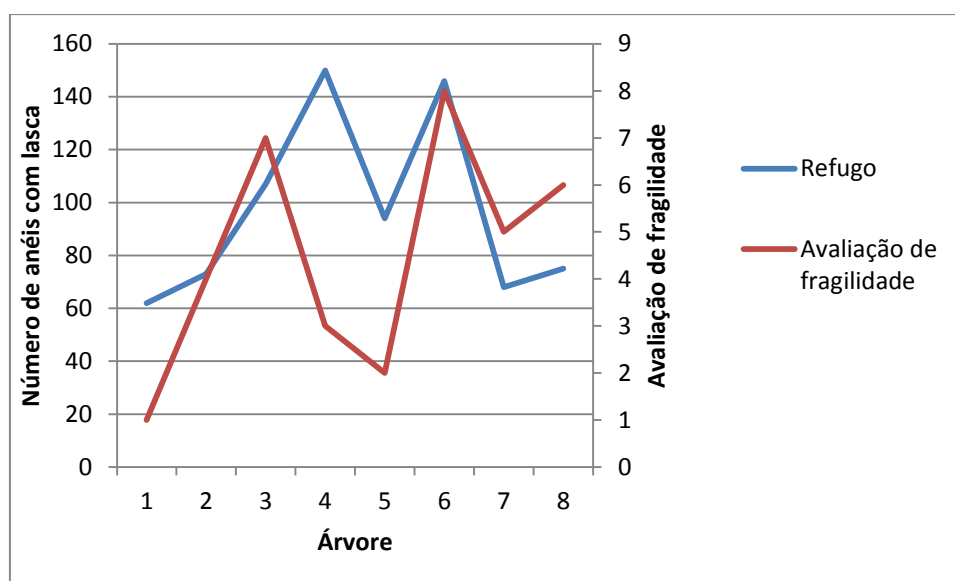


Figura 6-14. Gráfico de sobreposição do número de lascas com a avaliação da dureza

No gráfico acima, apesar de haver algumas diferenças entre a variação das duas curvas, pode observar-se que as árvores que tiveram melhor resultado na avaliação de dureza também foram as que apresentaram um menor número de lascas. Tanto a árvore 1 como a 5 e 7 apresentaram baixo número de refugo para valores de dureza também alta.

Assim verifica-se que o estudo do refugo permite retirar algumas conclusões relativas à influência da dureza no aparecimento de lascas mas, pelo contrário, não demonstra conclusões acerca do valor óptimo dos parâmetros em estudo isto é: com valores de parâmetros diferentes adquire-se diferentes valores de refugo mas não é possível saber ao certo qual a conjunto de valores que otimizam a dureza.

6.2.2. Análise de resultados- Minitab

O programa estatístico Minitab permite examinar com facilidade a influência e interação que os parâmetros estudados têm individualmente (figura 6.15) e entre eles - interação de parâmetros (figura 6.16) - uma vez que relaciona os resultados dos ensaios entre si. Isto permite-nos saber qual o parâmetro que mais influencia a ocorrência do caso em estudo (número de lascas) e relacionando os parâmetros dois a dois é possível retirar não só, pontos ótimos do processo como também valores indesejáveis .

Introduzidos os valores de refugo retiramos:

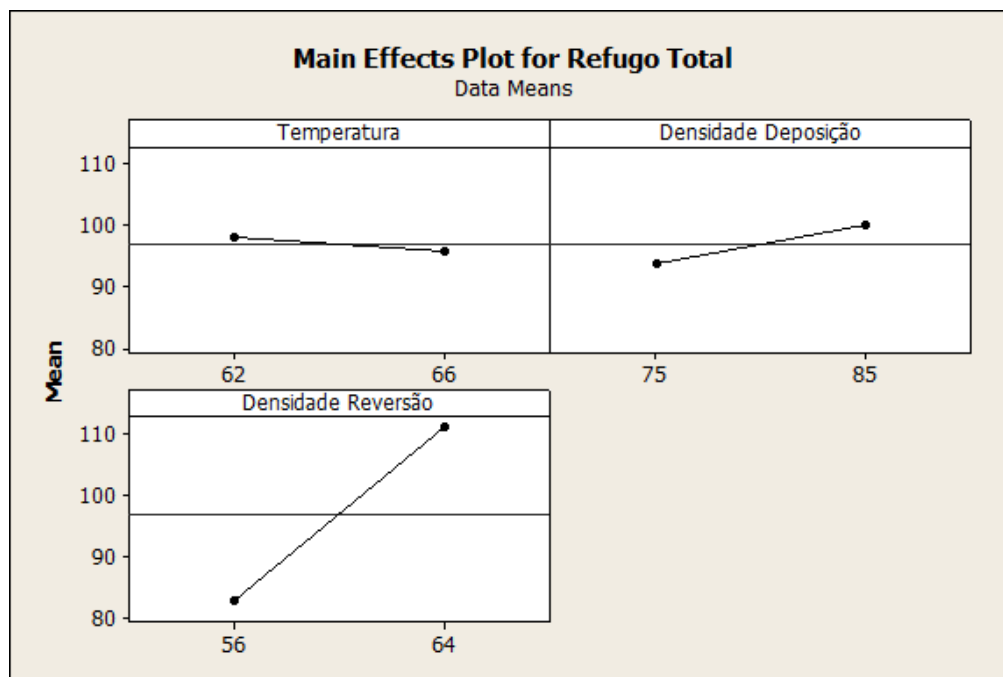


Figura 6-15. Influência dos diferentes parâmetros no aparecimento de lascas- Minitab

No eixo das abcissas estão os dois valores atribuídos a cada parâmetro estudado e no eixo das ordenadas corresponde à média da variável de resposta, em que a resposta neste caso, corresponde a lascas na camada cromada de segmentos de produção.

Analisando os gráficos da influência individual de cada parâmetro, observa-se que tanto a densidade de corrente de deposição como a densidade de corrente de reversão aumentam o número de lascas quando se aumenta o seu valor. Já o aumento da temperatura faz diminuir o aparecimento de lascas.

Para além disto, pelo declive da recta, é possível deduzir uma maior ou menor influência de cada parâmetro no número de lascas. Verifica-se assim que a temperatura e a densidade de corrente de deposição são os parâmetros com menos influência. Pelo contrário, apresentando o maior declive, a densidade de corrente de reversão parece ser o parâmetro que mais influencia o aparecimento de lascas.

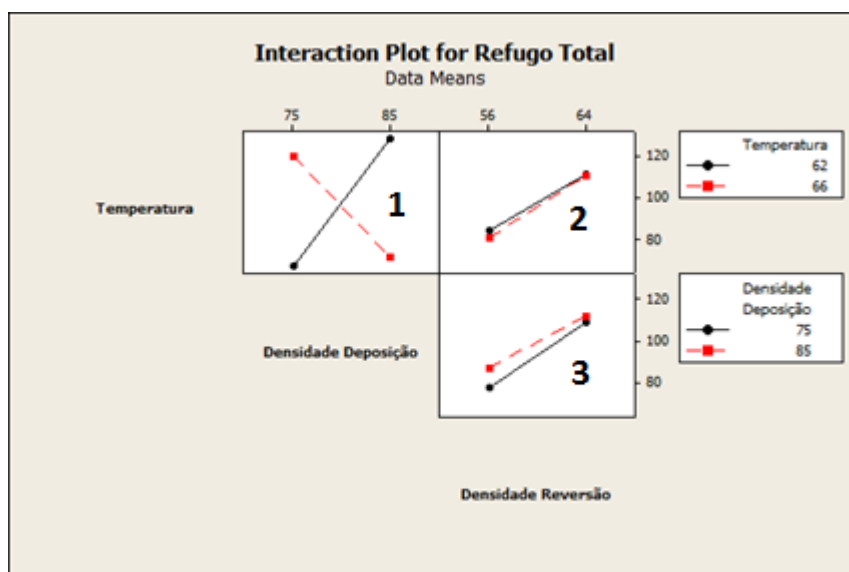



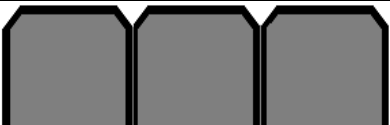

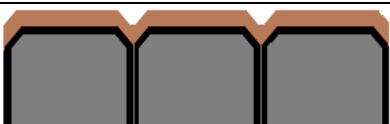



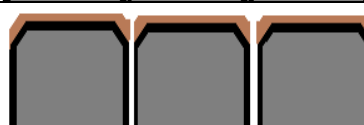

Figura 6-16. Interação entre parâmetros- Minitab

Na figura 16, o gráficos de interação 1 e 2 relacionam a temperatura com a densidades de deposição e com a densidade de reversão (respectivamente), estando no eixo das abcissas os valores das densidades de corrente e, representado com a cor preta e vermelha, as temperaturas de 62°C e 66°C respectivamente. O gráfico 3 representa a interação entre as duas densidades de corrente estando no eixo das abcissas a densidade de reversão e representado pelas linhas preta e vermelha a densidade de corrente de deposição.

Na análise ao gráfico 1 verifica-se que as duas variáveis (temperatura e densidade de deposição) têm grande interação. Para se obter valores baixos de refugo, deve-se então optar por temperaturas de 62°C e densidade de corrente de deposição de 75A/ dm² ou, no caso de ser desejável aumentar a temperatura, (caso de se pretenda diminuir a densidade de fissuras e consequente porção de cerâmica depositada nas mesmas), deve-se aumentar também a densidade de corrente para minimizar o refugo. Já nos gráficos 2 e 3 as variáveis têm pouca relação uma vez que as linhas são praticamente paralelas. Conclui-se que há um valor de densidade de corrente de reversão ótimo de 56A/dm² que permite obter valores de refugo menores para qualquer valor de temperatura ou de densidade de corrente de deposição.

Ainda em relação à análise do refugo, foi identificado um momento que demonstrou estar também na sua origem. Durante a desmontagem dos segmentos das árvores constatou-se (durante o processo de rectificação que acontece depois da cromagem) que, devido à existência de excentricidade nas árvores, a porção de camada retirada do segmento era maior de um dos lados em relação ao outro. Verificou-se então que este facto era uma causa óbvia de formação de lascas. A figura 6.17 representa

a sequência do processo de cromagem desde a montagem até à desmontagem das árvores evidenciando o motivo para o aparecimento de lascas.

Operação	Situação ótima	Problema com excentricidade
Montagem de árvores		
Retificação cilíndrica		
Cromagem		
Retificação cilíndrica		
Separação dos segmentos		

Quando os segmentos chegam à estação de cromagem como mostra a figura 3.6, num
Figura 6-17. Sequência de fases entre a montagem e desmontagem de árvores no processo de cromagem

processo anterior, efetuam a retificação do chanfro. Este chanfro, durante a produção, tem como papel principal o auxílio na separação dos segmentos após cromagem.

Depois da montagem dos segmentos, a árvore é cilíndricamente retificada. No caso de a árvore ficar com excesso de excentricidade, o arrancamento de material base vai ser maior de um lado que do outro, o que vai originar profundidades de chanfros diferentes. Após cromagem, aquando a retificação cilíndrica, mais uma vez devido a problemas de excentricidade, a quantidade de Crómio retirado é maior de um lado que do outro. Isto leva a que, do lado mais retificado, se observe uma face perfeitamente cilíndrica ao longo de toda a árvore. Devido à camada não conter os “canais” que diferenciam os segmentos, estes quando separados, fraturam o revestimento de Crómio em pontos aleatórios (e não nos “canais”), originando lascas.

6.3. Confirmação dos Resultados

6.3.1. Ensaios

Do estudo realizado até este ponto percebeu-se qual é a influência de cada parâmetro no aparecimento de lascas e qual a influência tendo em conta a interação entre eles. Analisados os gráficos chegou-se a três combinações de valores que se achou importante testar para concluir de um melhor modo este trabalho.

Decidiu-se cromar segmentos com um programa de cromagem com os valores dos parâmetros obtidos do gráfico de influência individual (ensaio 1 da tabela 5) que por sua vez também corresponderam a um dos melhores resultados de avaliação de dureza (amostra 5 da figura 6.11).

Do gráfico das interações retiraram-se os valores (ensaio 4 da tabela 5) que aparentemente otimizavam o processo que corresponde ao melhor valor de refugo retirado dos testes anteriores (árvore 1, tabela 4).

Do melhor resultado, tanto de avaliação de dureza como de refugo, (amostra 1 e árvore 1 da tabela 3 e 4), quando relacionados os dois gráficos do *Minitab*, considerando que individualmente um aumento de temperatura é favorável à redução de refugo. Por isso decidimos aumentar o valor de temperatura para um valor intermédio de 64°C. Olhando para o gráfico de interações, devido à grande interação que tem a temperatura com a densidade de corrente de deposição, no caso de se aumentar a temperatura deve-se aumentar também a densidade de deposição. Elevou-se por isso também a densidade de corrente de deposição para um valor intermédio de 80A/dm² (ensaio 2 da tabela 5).

Como termo de comparação optou-se por cromar uma árvore com as condições atuais de produção. (ensaio 3 da tabela 5).

Tabela 5. Ensaios de confirmação

	Condições para ensaio final			
Ensaio	1	2	3	4
Fator	Influência individual	Relação de gráficos	Condição atual	Interação de parâmetros
Temperatura, °C	66	64	64	62
Densidade de corrente de Deposição, A/dm ²	75	80	80	75
Densidade de corrente de Reversão, A/dm ²	56	56	60	56

6.3.2. Resultados Metalográficos

Tal como todos os ensaios efetuados anteriormente, também estes ensaios passaram pela aprovação do laboratório metalográfico (tabela 6).

Tabela 6. Análise metalográfica

Ensaio	Dureza 900 - 1200 HV0,1	D. Fissuras 60 - 110 unid/mm	Teor Cerâmica 3 - 6%	Camada Total [µm]
1	976	90	2,9	146,7
2	973	89	3,2	160,1
3	1012	93	3,3	163,7
4	953	93	3,3	147,7

De todos os parâmetros analisados apenas o teor de cerâmica não corresponde ao especificado pela empresa; Este valor já se esperava ser baixo uma vez que, temperaturas elevadas resultam numa diminuição do número de fissuras. Isto associado a uma incidência baixa de densidade de corrente de reversão (com o objetivo de abrir estas mesmas fissuras), impede a adesão da cerâmica. Para que o teor de cerâmica se encontrasse dentro dos valores especificados ter-se-ia de alterar a temperatura, o tempo de aplicação de corrente de deposição ou mesmo a concentração de cerâmica no banho.

Os restantes valores ficaram todos dentro do especificado pela empresa, confirmando-se por isso todos os ensaios anteriormente efetuados.

6.3.3. Resultados dos Ensaios de Confirmação

Tabela 7. Refugo relativo a lascas final

Arvore	Ensaio	Lascas	%Lascas
1	Efeito individual	66	19%
2	Fator influente	35	10%
3	Produção normal	43	12%
4	Interação de parâmetros	119	35%

Tal como nos teste feitos anteriormente em que o valor de refugo da árvore 5 (tabela 4), - que apresentava os parâmetros com os mesmos valores do ensaio 1 relativo aos efeitos individuais- o resultado deste ensaio apresentou um valor de refugo elevado. Isto leva-nos a concluir que os gráficos dos efeitos individuais apenas nos mostra a tendência do aparecimento de lascas quando da alteração individual de cada parâmetro.

Em relação ao ensaio 4 referente ao estudo da interação de parâmetros demonstrou ser - contrariamente ao ensaio 1 efetuado anteriormente (na tabela 4 ensaio com menor refugo) - o ensaio com mais refugo tendo sido contados no final 119 segmentos com lascas. Este valor não era esperado o que nos leva a assumir que algo tenha originado o aparecimento de lascas como: falha de jateamento, problemas de retificação ou excentricidade.

No que diz respeito ao ensaio 2, retirámos o melhor valor de refugo (menor 2% do valor de produção normal), o que nos leva a dizer que este terá a condição que otimiza a dureza da camada. Os resultados deste ensaio mostram assim - quer a nível de condições, quer a nível de refugo – que a solução que otimizam a dureza, não está longe da condição atual pois a única coisa que difere é o valor de densidade de corrente de reversão - de 60 para 56 A/dm². Também se pode retirar que aquando da análise dos gráficos *Minitab*, não se devem tirar conclusões diretamente a partir de um determinado gráfico mas sim analisando os dois paralelamente.

A redução de dois pontos percentuais do valor de refugo conseguida com este ensaio, é muito positiva. Representa a nível de produção diária, um aumento de cerca de 700 segmentos, o que naturalmente se traduz num aumento significativo de lucro para a empresa.

Quanto ao ensaio relativo à cromagem de segmentos nas condições atuais verifica-se um valor de refugo de 12% equivalente ao valor real na produção diária de segmentos.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu no estudo de um processo de cromagem de segmentos de pistão. Foi realizado com o objectivo de melhorar este processo no sentido de diminuir o desperdício de peças produzidas. Este desperdício deve-se a defeitos na camada de revestimento e está logicamente associado a custos para a empresa.

O primeiro passo foi detetar em que fase de produção seria mais urgente atuar: constatou-se que 12% dos segmentos produzidos numa determinada linha de cromagem (linha de multicamadas), apresentavam lascas na face de contacto e nas suas pontas no final do processo sendo por isso desperdiçadas por não apresentarem condições para serem comercializadas (refugo).

O projeto focou-se na estação de cromagem onde os segmentos recebem uma fina camada de Crómio, de alta dureza que lhes confere maior resistência a corrosão e desgaste. Contudo, esta camada tem um ponto fraco que é a sua fragilidade devido à sua elevada dureza, ou seja, o modo como suporta as deformações e choques.

Para reduzir a percentagem de refugo, decidiu-se então atuar sobre a dureza da camada, alterando os parâmetros que a influenciam e analisando os resultados numa tentativa de otimiza-la.

Seguindo a metodologia Seis Sigma, que é uma ferramenta de melhoria contínua do processo, começou-se por tentar definir quais são os parâmetros mais influentes na dureza da camada. Chegou-se à conclusão que estes parâmetros são a temperatura e as densidades de corrente (de deposição e de reversão). Após planeamento (com auxílio da matriz experimental retirada do DOE) e realização do procedimento experimental, analisaram-se os resultados e chegaram-se a algumas conclusões.

Passou-se para o planeamento da experiência que foi feito de acordo com a matriz de experiências retiradas do DOE. Depois, realizaram ensaios tanto em provetes de teste como em segmentos de produção normal. Neste ensaios fizeram-se variar os parâmetros em estudo.

As amostras foram submetidas a ensaios destrutivos - *Scratch test*, Nano Indentação e *Ball Cratering* - e após estes, foram analisadas as características da camada cromada ao microscópio. Nesta análise foi possível verificar apenas nos ensaios de *Scratch test* diferenças concretas entre diferentes ensaios como o número de fissuras, descascamento ou delaminações na secção de corte. Tanto o teste de Nano indentação como o Ball cratering demonstraram não ser apropriados para este tipo de camada.

Conclui-se com isto que uma simples alteração dos valores dos parâmetros do programa de cromagem, conduz a uma alteração significativa das características internas da camada. Contudo, por não nos ser possível concluir que valor otimiza a dureza (a partir das imagens) cromaram-se segmentos de produção normal com os mesmos valores de parâmetros e contabilizou-se o refugo existente no final do processo de fabrico. A resposta foi semelhante à avaliação feita nas imagens a microscópio, o que conduziu à conclusão de que, por um lado a dureza é um parâmetro que influencia o aparecimento de lascas, e por outro, que é possível, através da análise microscópica, saber qual o comportamento de uma camada mais ou menos frágil de maneira a melhorar o controlo de qualidade da fábrica. Apesar deste avanço, será ainda necessário efetuar mais testes para se encontrar a correlação que permita utilizar a microscopia como ferramenta para antecipar diferentes condições de dureza.

Para além disto, analisaram-se mais profundamente os valores de refugo numa tentativa de os relacionar com os parâmetros do programa de cromagem.

Por meio do programa *Minitab*, foram analisados estatisticamente os valores de refugo no que diz respeito à influência que um parâmetro tem individualmente no seu valor e ainda em relação à influência que tem a interacção dos três parâmetros estudados.

Passou-se então para um estudo por contabilização do valor de peças com defeito. Por meio de gráficos concluiu-se que tanto a temperatura como a densidade de corrente de deposição têm baixa influência no aparecimento de lascas quando comparado com a densidade de corrente de reversão que é o parâmetro com maior influência. Para além disto percebeu-se também, que existe grande interacção entre a temperatura e a densidade de deposição: no caso de se pretender aumentar uma ter-se-á de reduzir a outra e vice-versa no sentido de otimizar a camada quanto ao aparecimento de lascas.

No final desta etapa de ensaio, foram planeados e realizados novos ensaios com o intuito de confirmar os resultados obtidos. Esta confirmação foi feita através da comparação e interpretação dos resultados dos dois ‘ciclos’ de ensaios. Destes ensaios verificamos que não

se deve ter em conta cada gráfico individualmente (influência individual e interação de parâmetros) mas sim relaciona-los chegando deste modo a valores intermédios que otimizem o processo.

O estudo estatístico levou-nos a uma resposta que no final deu origem à redução do refugo em 2 pontos percentuais otimizando assim o processo e podendo vir a contribuir para um aumento do lucro final da produção da empresa.

Conclui-se que os valores dos parâmetros utilizados atualmente não são os ótimos mas que se encontram muito próximos, o que comprova que apesar de a extrema dureza ser uma propriedade relevante para o aparecimento de lascas na camada, trabalhos posteriores com o mesmo objetivo deverão focar-se nas estações anteriores ou posteriores à cromagem como por exemplo o melhoramento da excentricidade e condições de retificação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Warcholinski., A, Gilewicz., "Tribological properties of CrN coatings". 2009
- [2] C. Carvalho., "A melhoria da qualidade suportada na metodologia Seis Sigma: O caso da tecnimaster".Universidade Fernando Pessoa,Porto, Dez, 2008
- [3] C. Souza., "Avaliacao da Resistencia ao Desgaste de Uma Resina Composta Odontologica Nanoparticulada Empregando Diferentes Tempos Fotopolimerizacao". 2009
- [4] D. Cardona., J, Florez., "Propiedades Eléctricas de Nano-Multicapas de Cr/CrN". 2009
- [5] E. Svenson., "DuraChrome Hard Chromium Plating",- Surface Finishing Technology. 2006
- [6] MAHLE Componentes de Motores S.A., "Perfomance – Components and systems for the engine and its periphery", 2006
- [7] M. Ferreira., "Optimização de processos PVD tendo em vista ganhos de produtividade". 2008
- [8] Metal Finishing., "68 th Guidebook and directory issue"- Reginal E.Tucker, 2000
- [9] M. Hammar., "*ISO 9001 Documentation templates and Expert Advise*". <http://www.9001academy.com/blog/iso-9001-vs-six-sigma-compare-different/>. Fev, 2015
- [10] M. Mandich., D, Snyder., "Electrodeposition of chromium". Modern Electroplating, Fifth Edition. 2010
- [11] M. Martins., A, Santos., "Modelo de referência para estruturar o Seis Sigma nas organizações". Jan - abr, 2008
- [12] M. Singleton., "Advances in the theory and practice of hard chromium plating". University of Sheffield., 1986
- [13] S. Kuiry., "Advanced Scratch Testing for Evaluation of Coating". Bruker, 2012
- [14] S. Trad., A, Maximiano., "Seis Sigma: Factor Críticos de Sucesso para sua Implantação", AMPAD, 2009.
- [15] Technical Teport., "A guide for selecting the type of chrome plating for use in contact with BALtm Seals in Rotary and reciprocating service". Technical Report, 2003.

- [16] E. Hausch., “Sistemática de desenvolvimento para projeto de produto com qualidade dimensional na indústria automobilística”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009